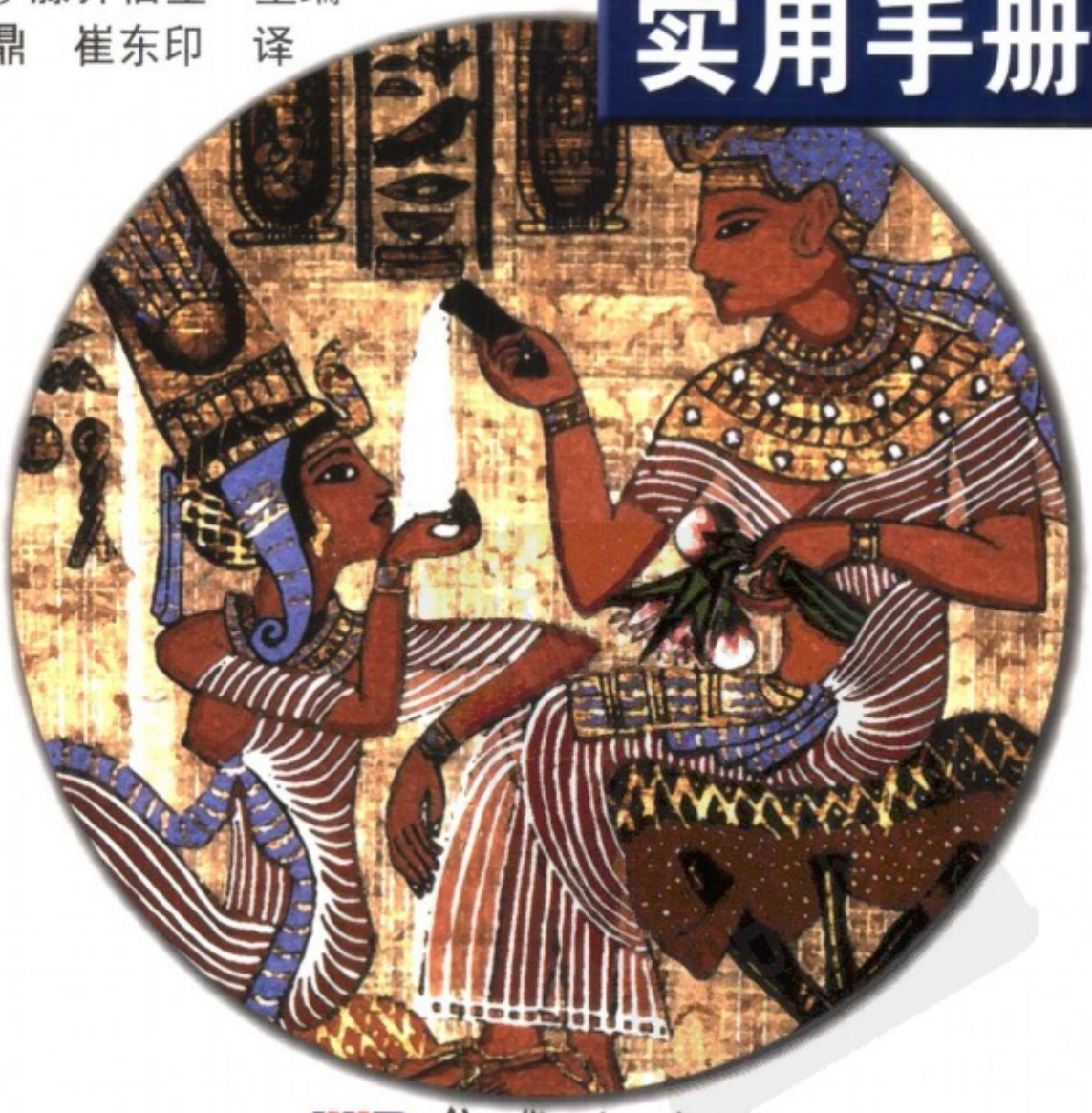
Technology 实用技术

OHM handbook 第二版

电子

实用手册

〔日〕藤井信生 主编
薛培鼎 崔东印 译



科学出版社
www.sciencep.com

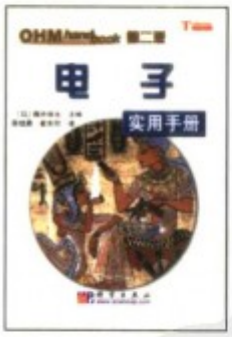
(TN-0734.0101)
责任编辑　赵方青　崔炳哲
责任制作　魏　谨
封面设计　李　力

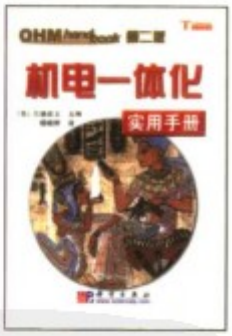
Technology
实用技术

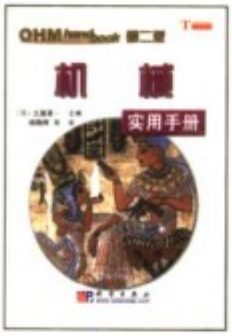
丛书特点

★ 方便选择学习	各章内容相对独立，可根据需要选择学习
★ 提高学习效率	板块式的编写方式，有利于提高学习效率
★ 满足不同要求	系统性强，从基础知识到应用技术
★ 版 式 新 颖	重点名词标注在正文左侧，便于查找。书末给出索引
★ 便 于 学 习	丰富、易懂的图表，快速掌握相关内容









ISBN 978-7-03-018262-3
9 787030 182623 >

建议上架类别：工业技术／电子技术

科学出版社 东方科龙
http://www.okbook.com.cn
cuibingzhe@mail.sciencep.com

定　价：42.00 元

OHM handbook 第二版

电子

实用手册

科学出版社
北京

图字：01-2006-2186 号

内 容 简 介

本书为“OHM handbook”系列之一。该系列共 4 册，分别对电工、电子、机械及机电一体化等专业领域的基础理论知识、典型应用以及最新发展动态进行介绍。本系列特点是内容丰富但精练，重点突出，插图丰富，有重点名词提示，并在书末附有中文索引。

本书共 10 章 193 节，重点介绍电子物理、电子器件、模拟与数字电路、电子测量与控制、信息与通信等电子学的基础知识及应用技术。此次再版依据近 10 年间电子技术的进步，以计算机、通信及网络技术为中心进行修订，增加了许多新应用技术和新电子装置的介绍，还插入了不少的科学趣味知识。

本书既适于电子类大、中专师生及广大电子爱好者学习与参考，又适于相关领域的科研人员和工程技术人员随时翻阅。

图书在版编目(CIP)数据

电子实用手册/〔日〕藤井信生主编；薛培鼎，崔东印译. —2 版.
—北京：科学出版社，2007
(OHM handbook)
ISBN 978-7-03-018262-3

Ⅰ.电… Ⅱ.①藤… ②薛… ③崔… Ⅲ.电子-手册 Ⅳ.TN-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 148902 号

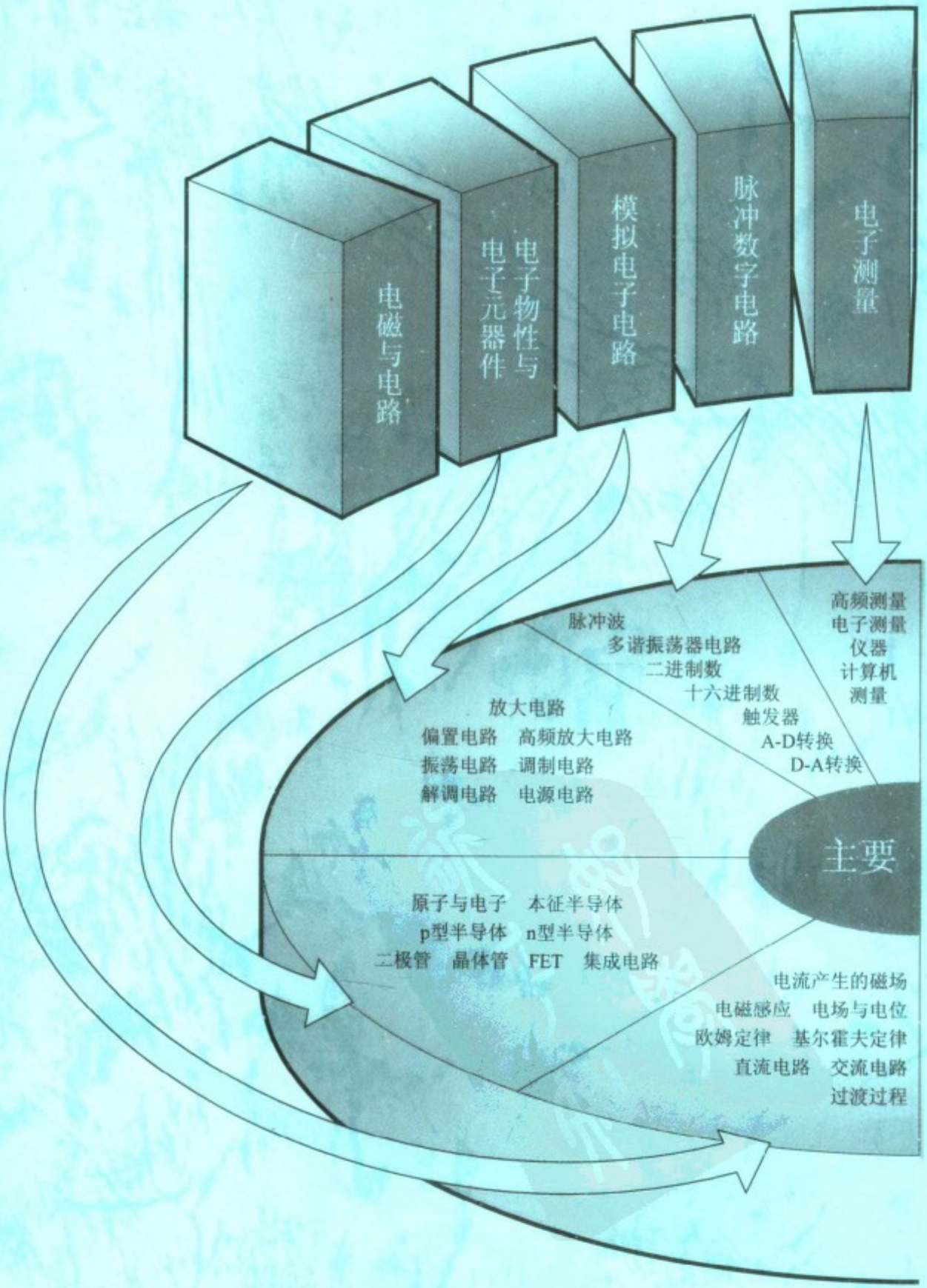
责任编辑：赵方青 崔炳哲 / 责任制作：魏 谨
责任印制：刘士平 / 封面设计：李 力
北京东方科龙图文有限公司 制作
http://www.okbook.com.cn

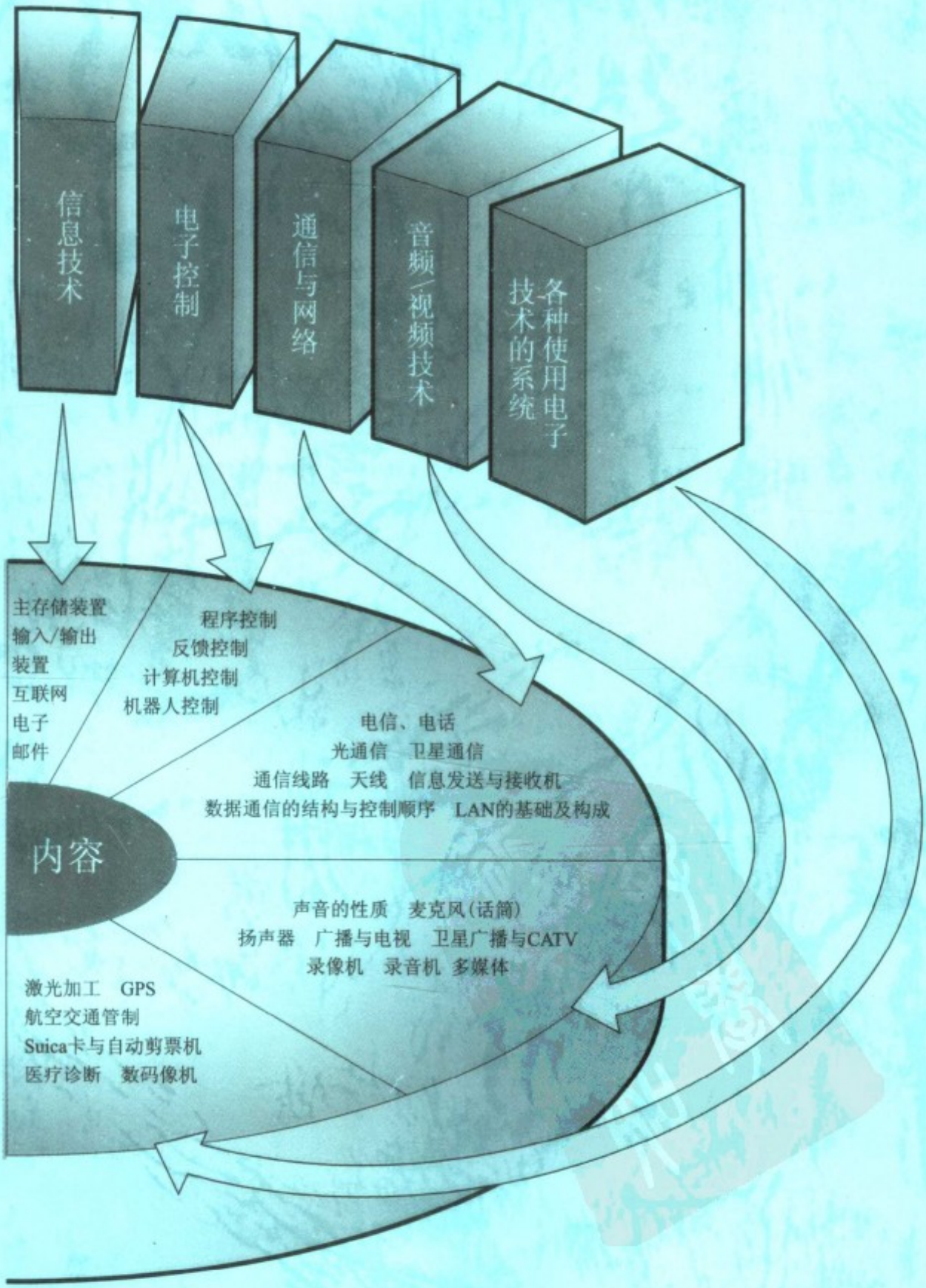
科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

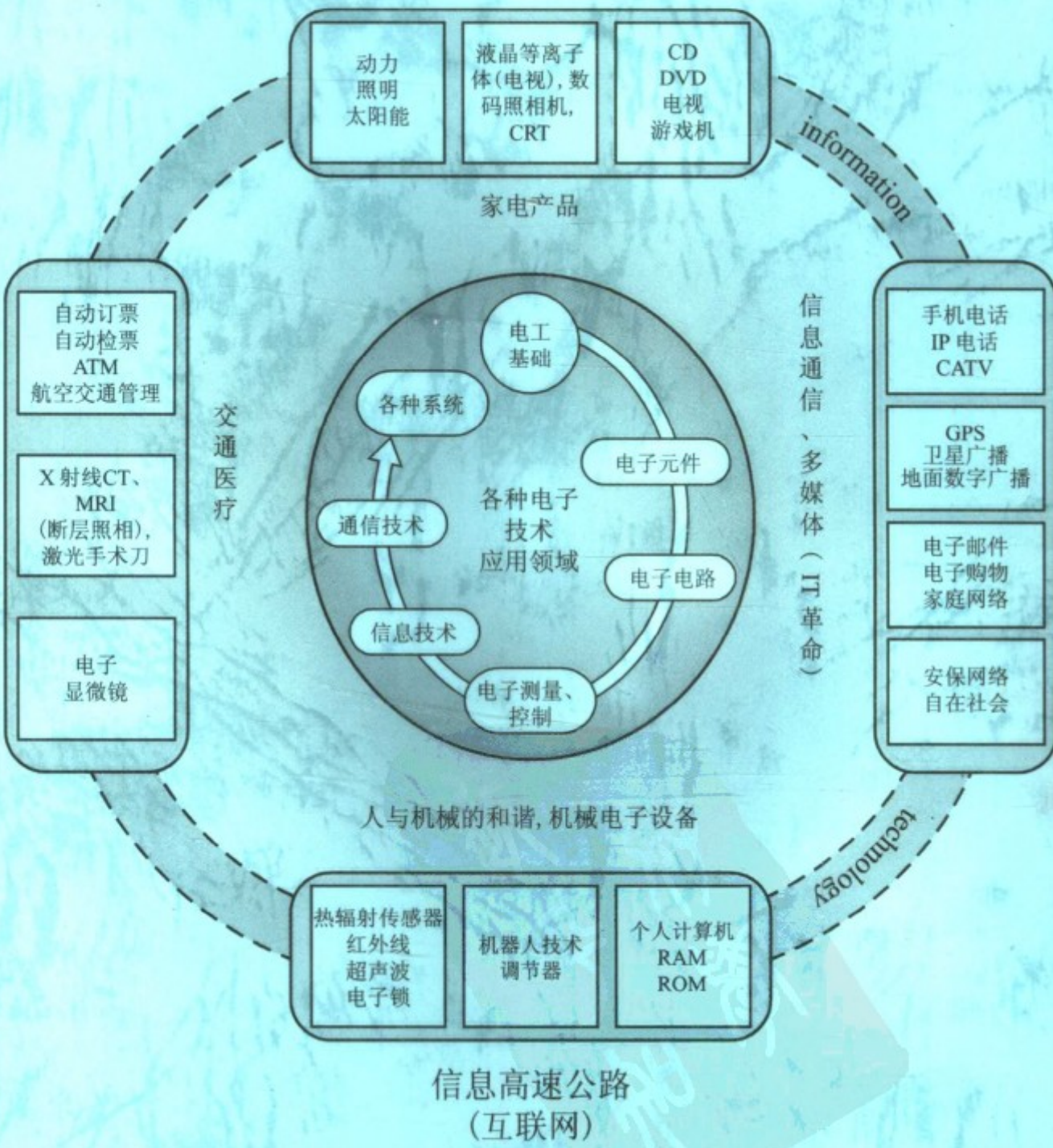
新蕾印刷厂 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2001 年 8 月第 一 版 开本：A5(890×1240)
2007 年 1 月第 二 版 印张：19 1/2
2007 年 1 月第七次印刷 字数：494 000
印数：20 001--25 000

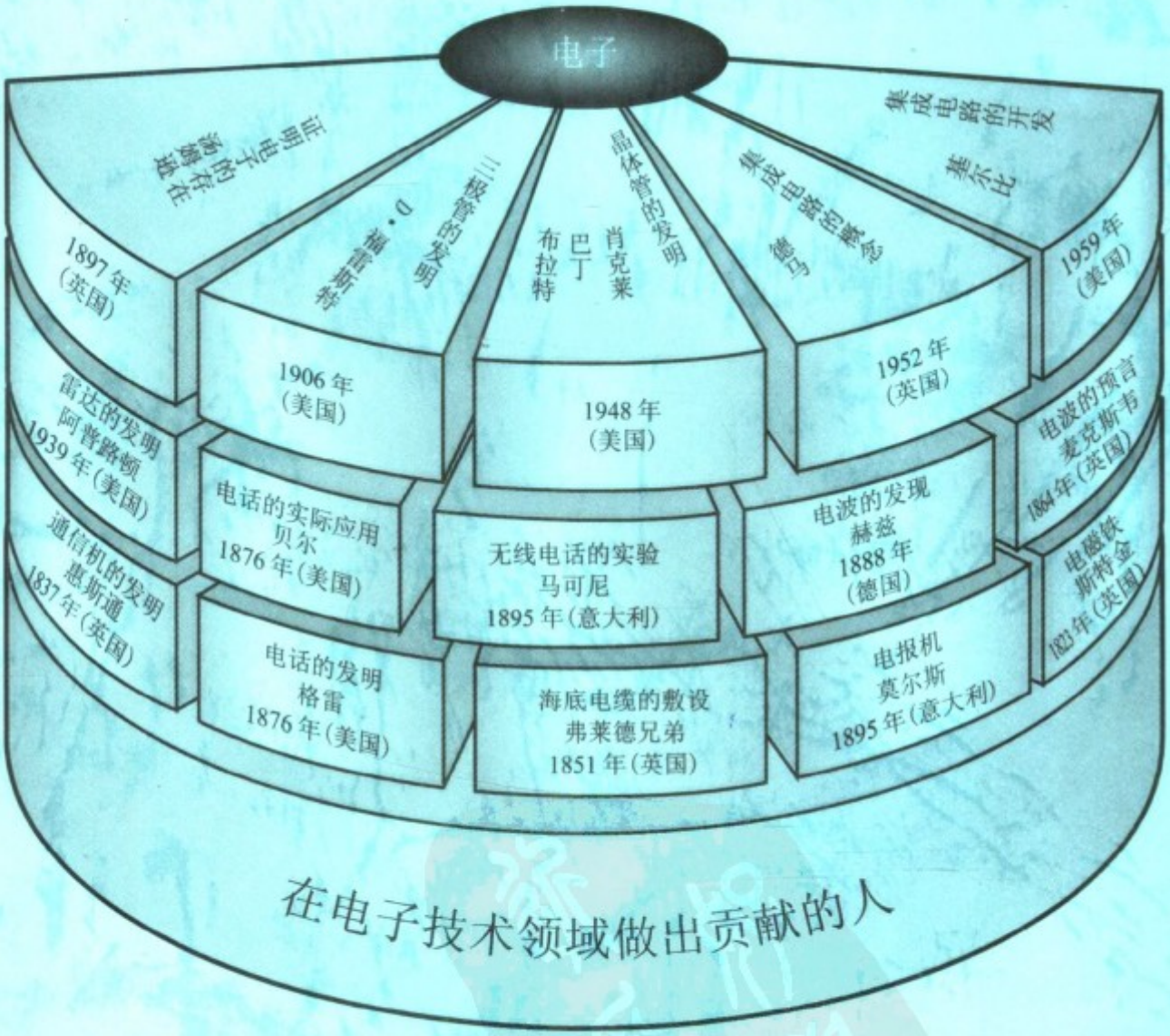
定 价：42.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换〈环伟〉)


电磁与电路
电子物性与电子元器件
模拟电子电路
脉冲数字电路
电子测量
高频测量
电子测量仪器
计算机测量
脉冲波
多谐振荡器电路
二进制数
十六进制数
触发器
A-D转换
D-A转换
放大电路
偏置电路 高频放大电路
振荡电路 调制电路
解调电路 电源电路
主要
原子与电子 本征半导体
p型半导体 n型半导体
二极管 晶体管 FET 集成电路
电流产生的磁场
电磁感应 电场与电位
欧姆定律 基尔霍夫定律
直流电路 交流电路
过渡过程


信息技术
电子控制
通信与网络
音频/视频技术
各种使用电子技术的系统
主存储装置
输入/输出装置
互联网
电子邮件
程序控制
反馈控制
计算机控制
机器人控制
电信、电话
光通信　卫星通信
通信线路　天线　信息发送与接收机
数据通信的结构与控制顺序　LAN的基础及构成
内容
声音的性质　麦克风(话筒)
扬声器　广播与电视　卫星广播与CATV
录像机　录音机　多媒体
激光加工　GPS
航空交通管制
Suica卡与自动剪票机
医疗诊断　数码像机


动力
照明
太阳能
液晶等离子体(电视),数码照相机,CRT
CD
DVD
电视
游戏机
家电产品
information
自动订票
自动检票
ATM
航空交通管理
X射线CT、MRI(断层照相),激光手术刀
电子显微镜
交通医疗
电工基础
各种系统
电子元件
通信技术
各种电子技术应用领域
电子电路
信息技术
电子测量、控制
信息通信、多媒体(IT革命)
手机电话
IP电话
CATV
GPS
卫星广播
地面数字广播
电子邮件
电子购物
家庭网络
安保网络
自在社会
人与机械的和谐,机械电子设备
technology
热辐射传感器
红外线
超声波
电子锁
机器人技术
调节器
个人计算机
RAM
ROM
信息高速公路
(互联网)



今天电子技术的发展，应归功于19世纪以后的各国科学家的努力。图中表示的是在电子元器件(最上层)、通信(2、3层)领域作出贡献的主要人士的名字和业绩。

译者的话

电子技术与人们的日常生活、工作密不可分，了解并掌握电子技术的基本知识已成为人们的普遍需要。基于这种形势，日本欧姆出版社于1996年出版了由东京工业大学藤井信生教授主持编写的《电子实用手册》(初版)。编者认为，对于一般读者来说，“要理解飞速发展着的电子技术，最重要的并不在于深究最新技术，而在于牢固掌握电子技术的相关基本知识”(主编的话)。或许正是因为遵循了这一主导思想，该书在1996～2000年的4年间就先后重印了6次。我国的科学出版社曾于2001年将该书翻译成中文出版。

原书初版出版发行后的十年间，电子技术又以超乎人们想象的速度取得了更大进步，特别是以计算机和通信为中心的技术，其进步尤为显著。因此，日本欧姆出版社再次聘请藤井信生教授对初版进行了修订，删去了电子信息技术方面一些已过时的内容，增加了以计算机、通信和网络为中心的新内容，并特别针对互联网已经广泛普及到千家万户的当前现状，增加了许多相关知识的篇幅。

修订后的《电子实用手册》内容包括了电工学、半导体电子学与电子器件、模拟电子线路、数字电子线路、电子测量、计算机与互联网、控制装置与技术、通信装置与通信网、声像设备，以及从信息家电、医疗保健、住宅安保到GPS(全球卫星定位系统)、航空交通管制、列车控制与铁道交通管理等各类先进设备与系统。

该手册是一本全面介绍电子技术及其应用相关知识的通俗手册，可供希望学习电子技术知识的爱好者和大专院校师生学习参考使用，也可作为在各个领域中从事研究开发及工程技术工作的技术人员有效获取电子技术知识或随时翻阅的学习参考工具。现在，科学出版社将该书修订版的中译本献给我国读者，相信它对大家的学习、研究、开发和技术工作会有所帮助。

译　者

主编的话

电子学和我们的日常生活有着非常密切的关系。今天，即使说“没有电子学就不能正常地生活”这样的话也不过分。看一下我们的周围就不难发现，从电视机、CD 唱机、DVD 影碟机、手机、PC 机等这些简单的电子产品到新干线、飞机等大型的电子应用机器设备，真是数不胜数。

电子技术的进步在很大程度上依赖于所使用的电子元器件。最初，使用的是真空管。当时即使小的真空管也有三号电池那么大，而一台收音机就要用 3～5 个真空管。因此，难以小型化，像今天的手机这种体积小、重量轻的高性能电子产品的制造，当时简直是梦想。但是，随着晶体管的发明以及向着集成电路的方向发展，现在已经可以在仅仅 $1cm^2$ 面积的基片内集成几万到几千万个晶体管。电子技术正在各个方面支撑着我们今天的生活。

为了很好地理解迅速发展、进步的电子技术，最重要的是要好好学习电子技术的基本知识，而不必去深入研究那些最新的技术。可是，在广泛的电子技术领域里，哪些是基本知识呢？哪些又是重点呢？这是很难判断的。本书为了便于学习理解电子技术，并以不太依赖技术进步的基础知识为中心进行编写的。

然而，初版发行以来已经过去了 10 年，其间电子技术的进步大大超出了人们的预想，特别是以计算机和通信为中心的技术的进步非常显著。这样一来，第一版编写的部分内容则显陈旧，已不再适应发展的现状，于是，这次即以计算机、通信、网络技术为中心进行了修订。特别针对以广泛普及到家庭的互联网为中心的网络技术知识，增加了不少篇幅。

为了使对电子技术感兴趣而希望多学习一些知识的青年可以轻松愉快地学习，也为了其他领域的研究人员和工程技术人员能有效获得必要的电子技术知识，编者希望本书能成为他们手边的必备书而发挥作用。

藤井信生

编纂委员会

主　　编

藤井信生（东京工业大学教授，工学博士）

编纂委员

代表　福田　务（东京电气技术高等专修学校）
海野良次（东京都立小石川工业高等学校）
扇　浩治（东京都立荒川工业高等学校）
小市直人（前东京都立北丰岛工业高等学校）
菅谷光雄（东京都立小石川工业高等学校）
山本　诚（东京都立新宿山吹高等学校）
山本义男（东京都立荒川工业高等学校）

执　　笔

新井义博（东京都立北丰岛工业高等学校）
安藤武德（东京都立荒川工业高等学校）
猪狩一三（财团法人铁道综合技术研究所）
海野良次（东京都立小石川工业高等学校）
扇　浩治（东京都立荒川工业高等学校）
加藤清志（东京都立府中工业高等学校）
黑木启之（东京都立工业高等专科学校）
小市直人（前东京都立北丰岛工业高等学校）
柴崎年彦（东京都立工业高等专科学校）
菅谷光雄（东京都立小石川工业高等学校）
田中龙弥（前日本航空株式会社）
寺岛和彦（东京都立府中工业高等学校）
福田　务（东京电气技术高等专修学校）
藤牧秀信（东京都立府中技术专科学校）
星野达哉（东京都立科学技术高等学校）
宫本　修（东京都立八王子工业高等学校）
山本　诚（东京都立新宿山吹高等学校）
山本义男（东京都立荒川工业高等学校）

有关本书的说明

本书的构成

(1) 全书由10章193节构成。各节内容相对独立，均可独立作为手册使用。因此，不管从哪一节开始阅读都能很好地理解所讲内容。

(2) 各节按【要点】、【解释】的顺序通俗易懂地讲解相关内容，必要之处还设置了【相关知识】。

【要　　点】	在每一节的前头，对该节题目的结论进行概要性的叙述。
【解　　释】	设置了一系列醒目的小标题(带有◆记号的标题)，对【要点】的内容进行详细的说明。
【相关知识】	对与本节题目相关的事项和关键词作扼要的说明。

(3) 为了在短时间内了解每一节的内容，只要读懂【要点】，就可以迅速了解并掌握该节的知识。

(4) 根据需要，设置了【例题】、【应用知识】和【篇外话】。

【例题】为了帮助理解，设置了易懂的例题。

【应用知识】以有兴趣的相关话题或实际应用的装置等为例，介绍尖端技术等的话题。

【篇外话】为了掌握更多的有关电子学知识，介绍历史性发明人物的故事及电子技术相关的趣味事件。

(5) 在本书中的前环衬中介绍了通过本书都学到哪些电子学或电子技术。通过此结构图对全书内容一目了然。另外，在后环衬介绍电子技术应用领域及在历史上重要且有趣的发明或发现。

图与表的使用方法

(1) 为有助于理解内容，书中安排了约650幅插图和表格。在图中还适当地加入了简单易懂的说明。

(2) 如果技术人员能够将书中的图例摘抄到笔记本上，并经常翻阅，在阅读资料时就会发现它能起到很大的作用。

关键词的查询

(1) 文中的重要名词，用黑体字书写在每页的左侧。

(2) 重要名词以索引的形式列在书末，因此本书可当作工具书灵活使用。

科学出版社

科龙书友服务卡

亲爱的读者：

为了提高我们的图书质量以及选题策划水平，也使我们更好地为您服务，请您填写以下信息。我们会根据您的需要，定期地给您提供科龙图书目录。

姓　　名：_____ **电　　话：**_____ **传　　真：**_____

电子信箱：_____

工作单位：_____ **邮　　编：**_____

地　　址：_____

教育程度：初中(中职)□　高中(高职)□　本科□　硕士□　博士□

职　　业：技术人员□　科研人员□　教师□　学生□

曾购买科龙图书书名(条码上方有标注"东方科龙")：

_____ ISBN 7-03-_____

_____ ISBN 7-03-_____

对本书评价：_____

期望和要求：_____

所从事专业领域：_____

非常感谢您购买科龙图书，若您发现书中有误，请您填写以下勘误表，以便再版时及时更正，进一步提高本书的质量。

勘 误 表

页　码	行　数	错　误	修　改

备注：我公司承诺对于读者所填的信息给予保密，只用于我公司的图书质量改进和新书信息快递工作。已经购买我公司图书并回执本"科龙书友服务卡"的读者，我们将建立服务档案，并给予直接从我公司邮购图书95折免邮费的优惠。

回执地址：北京市朝阳区华严北里11号楼3层

科学出版社东方科龙图文有限公司电工电子编辑部(收)

邮编：100029

目录

第1章 电磁与电路

1 电　流 …… 2
2 电阻消耗电能 …… 5
3 电流产生的磁通量 …… 8
4 电流受到的磁通量力 …… 12
5 电磁感应 …… 16
6 自感与自感系数 …… 18
7 互感与互感系数 …… 20
8 线圈可储存磁能 …… 22
9 静电与库仑定律 …… 24
10 电场与电位 …… 27
11 电容器的电容 …… 29
12 电容器储存电能 …… 31
13 直流电路的 R、L、C …… 33
14 交流电 …… 37
15 交流电的复数表示法 …… 41
16 交流电路的 R、L、C …… 43
17 谐振电路 …… 47
18 基尔霍夫定律 …… 49
19 戴维南定理 …… 51

CONTENTS

20 电路的分布参数 R、L、C …… 54
21 过渡现象 …… 56

第2章 电子物性和电子元器件

1 原子与电子 …… 62
2 原子的排列和晶体 …… 65
3 能级和能带 …… 67
4 晶体中电子的运动 …… 69
5 本征半导体及其性质 …… 71
6 p 型半导体及其性质 …… 74
7 n 型半导体及其性质 …… 76
8 二极管的结构及其工作原理 …… 79
9 二极管的特性和使用方法 …… 81
10 晶体管的基本构造 …… 84
11 晶体管的工作原理和静态特性 …… 86
12 实际晶体管 …… 90
13 结型 FET …… 92
14 MOS 型 FET …… 94
15 集成电路 …… 97
16 数字 IC 和模拟 IC …… 100
17 存储元件 …… 102
18 半导体激光器 …… 104
19 约瑟夫森元件 …… 107

第3章 模拟电子电路

1 放大的原理 …… 112
2 基本放大电路 …… 115
3 放大电路的动态特性 …… 117
4 偏压电路(Ⅰ) …… 120
5 偏压电路(Ⅱ) …… 122
6 *h* 参数和等效电路 …… 125
7 小信号放大电路 …… 130
8 负反馈放大电路 …… 132
9 功率放大电路 …… 136
10 高频放大电路 …… 139
11 FET 放大电路 …… 141
12 运算放大器 …… 143
13 IC 化电路实例 …… 146
14 振荡的原理 …… 152
15 *LC* 振荡电路 …… 155
16 *RC* 振荡电路 …… 157
17 晶体振荡电路 …… 162
18 频率变换电路 …… 165
19 调制电路 …… 167
20 解调电路 …… 170
21 直流稳压电源 …… 172
22 逆变器与整流器 …… 177

第4章 脉冲数字电路

1 脉冲波 …… 182
2 开关电路 …… 184
3 多谐振荡器 …… 187
4 施密特触发电路 …… 191
5 微分电路与积分电路 …… 194
6 各种各样的整形电路 …… 197
7 锯齿波的产生 …… 199
8 脉冲放大电路 …… 202
9 用1和0表示数字 …… 205
10 二进制数和十进制数间的变换 …… 208
11 二进制和十六进制间的变换 …… 210
12 二进制小数的表示方法 …… 212
13 二进制的加法和减法 …… 215
14 数字IC …… 218
15 逻辑电路基础 …… 220
16 布尔代数 …… 225
17 NAND电路和NOR电路 …… 231
18 基本逻辑电路的组合 …… 233
19 半加器和全加器 …… 235
20 编码器和译码器 …… 237
21 触发器 …… 239
22 寄存器 …… 242
23 计数器及其原理 …… 245

24 A-D、D-A 转换电路 …… 247
25 脉冲调制解调电路 …… 250
26 数字钟表的构造 …… 253
27 锁相环与频率合成器 …… 255

第5章 电子测量

1 测量与误差 …… 260
2 仪表的分类与使用 …… 262
3 动圈式仪表 …… 265
4 数字万用表的构造 …… 268
5 高频电流的性质与测量 …… 271
6 电子电压表 …… 274
7 数字频率计 …… 277
8 信号发生器 …… 279
9 示波器 …… 281
10 X-Y 绘图机和X-Y 记录仪 …… 284
11 各种电桥 …… 286
12 高频功率的测量 …… 289
13 电场强度的测量 …… 292
14 噪 声 …… 296
15 传感器与生物体的检测 …… 299
16 光测量 …… 301
17 频谱分析仪 …… 303
18 FFT 分析仪 …… 306

19 各种应用测量 …… 309
20 计算机测量 …… 313

第6章 信息技术

1 计算机的构成 …… 318
2 控制装置和算术逻辑运算装置 …… 320
3 主存储装置 …… 323
4 中央处理装置的基本工作原理 …… 325
5 输入输出装置 …… 328
6 辅助存储装置 …… 331
7 操作系统 …… 335
8 程序语言 …… 337
9 互联网 …… 338
10 协 议 …… 341
11 WWW …… 343
12 电子邮件 …… 346
13 电子购物 …… 349
14 计算机安全问题 …… 352
15 信息化社会中的道德问题与管理 …… 356
16 IP 电话 …… 359

第7章 电子控制

1 顺序控制 …… 362
2 控制中所用开关器件的工作原理 …… 364
3 有触点继电器 …… 366
4 无触点继电器 …… 368
5 顺序图 …… 372
6 各种传感器式开关器件 …… 375
7 顺序控制器 …… 378
8 自保持电路 …… 381
9 联锁电路 …… 384
10 定时器电路 …… 387
11 顺序控制举例 …… 390
12 反馈控制 …… 393
13 频率传递函数和阶跃响应 …… 398
14 方框图 …… 403
15 频率响应分析法 …… 406
16 不同规律的控制动作的特性 …… 411
17 响应的改善 …… 414
18 计算机控制 …… 418
19 外部设备的连接 …… 421
20 接口电路 …… 423
21 机器人控制 …… 426

第8章 通信与网络

1 通信概述 …… 430
2 调制与解调 …… 433
3 电话的工作原理与电话机 …… 436
4 电话与电话交换机 …… 438
5 ISDN 的基本构成 …… 440
6 传输线的种类和构造 …… 443
7 多路复用通信的原理 …… 446
8 光通信 …… 448
9 电波的性质及传播方式 …… 450
10 发射机和接收机 …… 454
11 天线与馈线 …… 458
12 微波通信 …… 462
13 卫星通信 …… 465
14 数据通信的机制与控制顺序 …… 468
15 局域网(LAN)基础 …… 471
16 局域网的构成 …… 473
17 网络与协议 …… 476
18 IP 地址与子网掩膜 …… 478
19 通信及网络工作者的任职资格 …… 480

第9章 声像设备

1 声音的性质与人的听觉 …… 484
2 拾音器和扬声器 …… 487
3 摄像器件 …… 490
4 显像器件 …… 493
5 无线电广播 …… 499
6 电视原理 …… 503
7 电视广播系统的组成 …… 510
8 高清晰度电视和高画质电视 …… 514
9 卫星广播和 CATV …… 515
10 视频记录 …… 519
11 传　真 …… 523
12 音频放大器 …… 526
13 音频记录 …… 528
14 通过数字化来实现多媒体 …… 536
15 计算机图像制作 …… 540

第10章 各种电子技术应用系统

1 等离子体放电现象及其应用 …… 544
2 激光加工 …… 548
3 电子显微镜 …… 551
4 列车运行控制和安全信号设备 …… 554
5 自动剪票和订座系统 …… 556

6 GPS 定位 …… 561
7 航空交通管制系统 …… 563
8 身体的检测 …… 566
9 X 光透视和 CT 诊断 …… 569
10 速度的测量 …… 573
11 警戒装置 …… 576
12 信息家电与自在社会 …… 580
13 数码照相机 …… 584

索引 …… 589

第1章

电磁与电路

● 责任编委
福田　务
● 执　　笔
星野达哉

公元前，人类就对磁和静电有了一定的认识。经过长期的科学研究，发现了库仑定律和电磁感应现象等各种重要的定律和现象。这些基础知识在现代电子工程中也是非常重要的。

另外，随着人们对电气现象的研究，电路的研究也不断发展，为了分析电路创立了欧姆定律和基尔霍夫定律等重要法则。依据这些法则，使人们理解电路并定量分析电路成为可能。

因此，在本章中将介绍磁和静电的性质、电路的种类以及计算方法等电子学基础知识。

1　电　流

要　点

所谓电流就是“电荷的移动”。在金属中，则是带负电荷的电子的运动形成电流。电子是从负极流向正极，但电流的方向规定为从正极流向负极。电流的大小定义为单位时间内流过的电荷量。

解　释

电荷的流动

电荷

如图 1.1 所示，仔细观察可知，水流是水粒子（分子）运动所产生的。同样，电流也是由于带电粒子（**电荷**）的运动所引起的。电荷的定向运动就是电流。

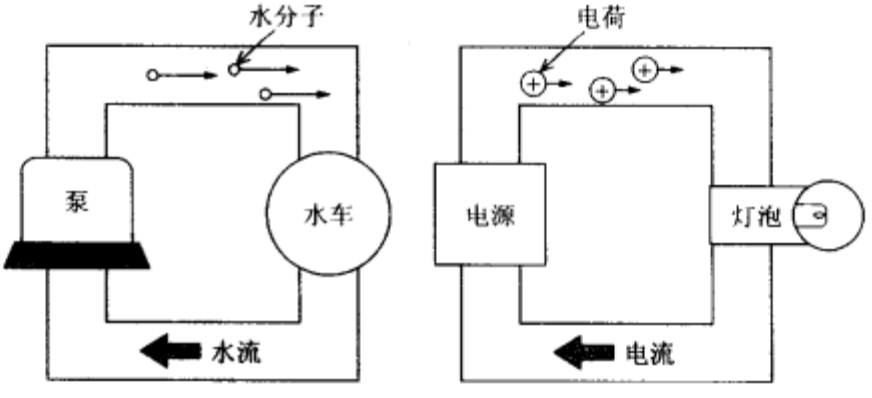


图 1.1　水流与电流

电子
离子

实际上，电荷就是构成物质的基本粒子。金属中的**电子**、电解液中的**离子**、半导体中的电子和空穴都是电荷，它们的定向运动形成电流（见图 1.2）。

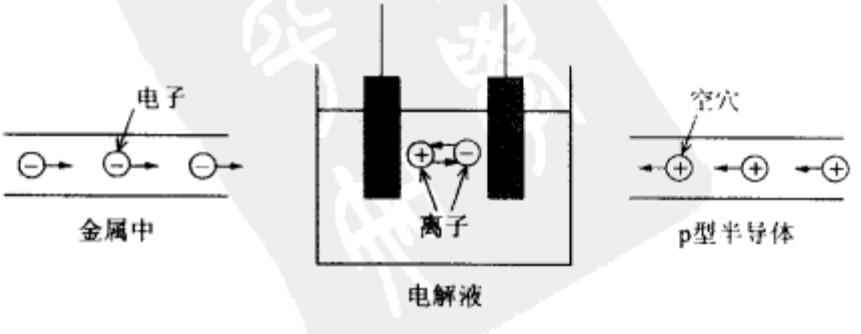


图 1.2　电荷的种类

电流的大小和方向

电流的大小可用每秒流过物体截面的电荷量表示，如果时间t(s)内流过的电荷量为Q(C)，可用式(1.1)求得电流I(A)为

$$I=\frac{Q}{t}\ (\mathrm{A}) \tag{1.1}$$

也就是说，如果1s内流过1C的电荷，电流即为1A。

电流的方向如图1.3所示，规定从正极流向负极。这样在金属等物体中，电流就和形成电流的电子运动方向相反。但是由于在电子发现之前，各种法则都是按照电流的方向从正极流向负极的规定考虑的，为避免混乱，于是就将与电子流动相反的方向规定为电流的方向。

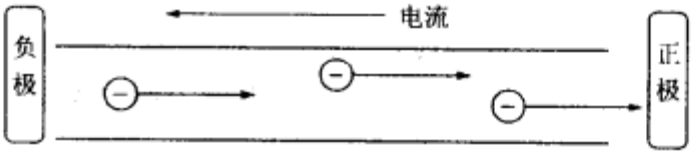


图1.3 电子的运动与电流

电子的速度与电场的关系

电场

对电荷产生作用力的空间称为**电场**。作为电荷粒子的电子受电场力的作用产生运动，但由于它与导体的原子发生碰撞，其能量几乎全部丧失。在电场强度不太高时，电子的运动速度v(m/s)与电场E(V/m)的大小成正比，即

$$v=\mu E\ (\mathrm{m/s}) \tag{1.2}$$

迁移率

式中的μ称为**迁移率**，它是由电子的质量及与原子的平均碰撞时间等所决定的常数。

电流与电压成正比

电压

物体中形成电流的电压力称为**电压**。如果在导体两端加上电压，就会形成电场，于是，物质中的电荷(电子)发生定向移动，产生电流。电场强度与所加电压的大小成正比，电场强度越大，电子的运动速度也就越大。例如，在水压高、水流速度大时，单位时间内从水龙头流出的水量就多。如图1.4所示，移动电子的速度越大，每单位时间内通过物体截

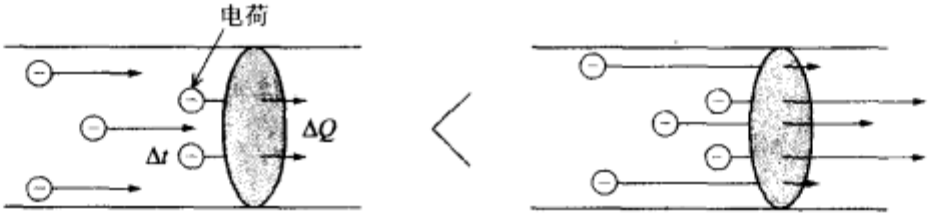


图 1.4　电荷的速度决定 $\Delta Q/\Delta t$

面的电子数就越多。所以，如果电压高，电流也与其成正比地增大。

流过每单位面积的电流大小称为电流密度 J（A/m^2）。设导体中每单位体积内的自由电子数为 n，则电流密度 J 可用式(1.3)表示，即

$$J=nQv=nQ\mu E=\sigma E \ (A/m^2) \tag{1.3}$$

电导率

式中 σ(S/m)称为**电导率**。电导率的大小取决于物质的种类和温度，电导率大的物质意味着单位体积中的自由电子数多。电导率的倒数称为**电阻率** $\rho(\Omega \cdot m)$。

电阻率

电荷不灭定律

电荷绝不会增加或减少。如图 1.5 所示，由于放电作用，物体所带电荷看似消失，这是由于正电荷和负电荷相互抵消(中和)所致，其本身绝不会消失。

在由直流这种恒定电流形成的闭合系统中，该定律可以比较简单地得到证明。但是在电场随时间变化、电荷的一部分流向另外系统的场合，为了验证电荷不灭定律，还必须考虑**位移电流**。由位移电流所产生的电场和磁通量的波动即为**电磁波**。

位移电流

电磁波

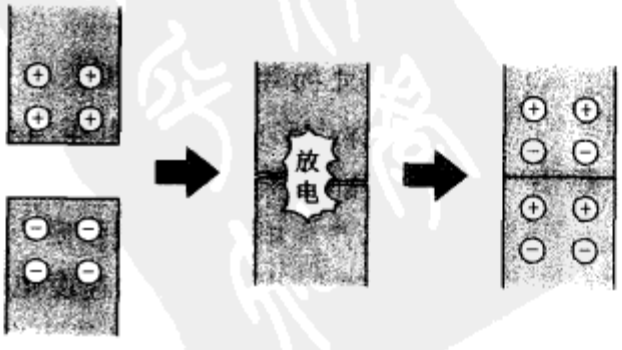


图 1.5　电荷的中和

2　电阻消耗电能

要　点

如果有电流流过电阻，电阻就会发热，称为焦耳热。可用焦耳定律表示电流和发热量之间的关系。另外所消耗的能量称为电能。

解　释

焦耳定律

如图 1.6 所示，如果电流流过电阻，电子将与电阻中的原子发生碰撞。电子的动能大部分由于碰撞而变为热能。这种热能称为**焦耳热**。

焦耳热

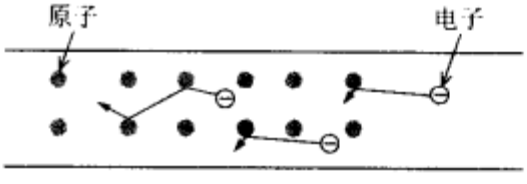


图 1.6　电阻中的电子运动

电流的产生，是因为电压 V(V)在电阻上产生了电场引起电荷 Q(C)移动的结果。因此电荷 Q 和电压 V 的积 QV 即为电荷从电场获得的势能。由于单位时间内流过的电荷量 Q 为电流 I，所以施加电压 V 在时间 t 内流过电流 I 所产生的电能为

$$W = IVt \ (\mathrm{J}) \tag{1.4}$$

焦耳根据导体中流过的电流能加热水的试验，确定了所增加的热量与电流的平方成正比、与时间 t 成正比的规律。这个规律称为**焦耳定律**，即

焦耳定律

$$W = RI^2t \ (\mathrm{J}) \tag{1.5}$$

式(1.5)也可以利用式(1.4)及**欧姆定律** $V = RI$ 求得。

欧姆定律

电能与做功

焦耳热也就是电能以热能的形式所消耗的能量。1s 所消耗的电能称为功率。在电阻上加电压 V(V)，流过电流 I(A)时的功率 P(W)可用式(1.6)表示，即

$$P=I^2R=IV=\frac{V^2}{R}\ (\mathrm{W}),(\mathrm{J/s}) \tag{1.6}$$

相关知识

◆ 最大功率供电

如图 1.7 所示，负载 $R(\Omega)$连接到电动势 $E(\mathrm{V})$的电源上时，R 的大小与负载所消耗的功率 P 间即有图 1.8 中曲线所示的关系，而且 $R=r$ 时 P 为最大。这里，r 为电源的内部电阻，表示电源自身所具有的电阻。由式(1.6)可知，P 是 R 的函数，这里可写为

$$P=I^2\cdot R=\left(\frac{E}{r+R}\right)^2\cdot R=\frac{E^2}{\dfrac{(r+R)^2}{R}}$$

$$=\frac{E^2}{\dfrac{r^2}{R}+2r+R}=\frac{E^2}{\left(\dfrac{r}{\sqrt{R}}-\sqrt{R}\right)^2+4r}$$

可见，负载电阻 R 与内部电阻 r 的大小相等时，供电功率 P 达到最大值。通常，为了能够使电源以最大功率供电均是将负载调整得满足上述条件，此称之为匹配。

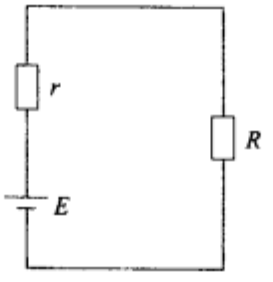


图 1.7　电源与负载电路

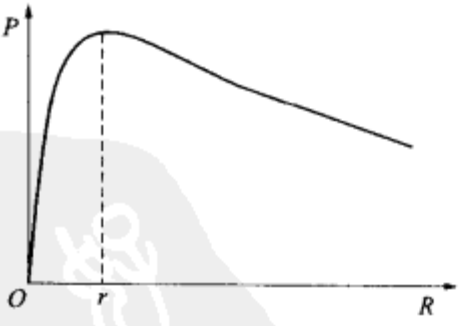


图 1.8　负载电阻的大小与所消耗功率的关系

例　题

有额定值为 100V、40W 和 100V、60W 的两只灯泡，如果串联后两端加 200V 的电压，求每个灯泡所消耗的电能为多少？

答　从式(1.6)分别求得灯泡的电阻为

$$\frac{100^2}{40}=250(\Omega),\ \frac{100^2}{60}=\frac{500}{3}(\Omega)$$

如串联后加 200V 电压，则通过的电流为

$$I=\frac{200}{250+500/3}=0.48(\mathrm{A})$$

从式(1.6)可得

40W 灯泡 $P=0.48^2\times250=57.6$（W）

60W 灯泡 $P=0.48^2\times\frac{500}{3}=38.4$（W）

3　电流产生的磁通量

要　点

如果导体或线圈有电流通过，其周围就会产生磁通量。磁通量的强度取决于电流的大小、距导体的距离及线圈的匝数。

解　释

电流与磁通量的关系

如果电流流过如图 1.9 所示的导体，从磁针的方向和铁粉的排列可知导体的周围产生了磁通量。这表示电流产生了与磁铁相似的力。如本章第 1 小节所述，电流是作为电荷的自由电子的移动，所以，电子的状态与磁力有密切关系。

电流所产生磁通量的方向如图 1.9 所示，电流与磁通量的方向分别对应于右螺旋的前进方向与转动方向。称之为**安培右螺旋定律**。

安培右螺旋定律

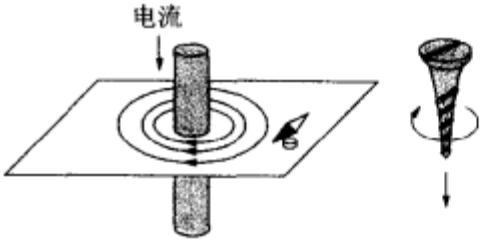


图 1.9　电流产生的磁通量

毕奥-萨伐尔定律

如图 1.10 所示，导线上流过的电流 I 在其外部的 P 点所产生的磁场强度，可以用导线上各微小长度 Δl 所产生的磁场强度 ΔH 的叠加求得。ΔH 可用式(1.7)表示，即

$$\Delta H=\frac{I\Delta l\sin\theta}{4\pi r^2}\ (\mathrm{A/m}) \quad (1.7)$$

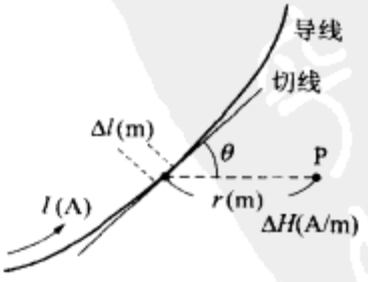


图 1.10　毕奥-萨伐尔定律

毕奥-萨伐尔定律

即为**毕奥-萨伐尔定律**。

安培环路定律

如图 1.11 所示，如果长度为 l 的闭合环路围成一圆周

安培环路定律

时，对磁场强度 H(A/m)沿该环路进行积分，则结果等于穿过该环的电流 I。这称为**安培环路定律**。

$$Hl = I \text{ (A)} \tag{1.8}$$

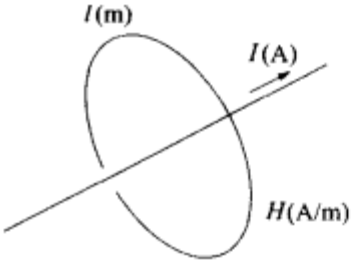


图 1.11 安培环路定律

直线电流的磁通量

如图 1.12 所示，流过直线导体的电流所产生的磁通量是以导体为中心的圆。如果圆周上某点到导体的距离(即半径)为 r(m)，则该点的磁场强度为 H(A/m)，根据安培环路定律，有

$$H \times 2\pi r = I \text{ (A)}$$

因而，磁场强度 H 可用式(1.9)求得，即

$$H = \frac{I}{2\pi r} \text{ (A/m)} \tag{1.9}$$

圆电流产生的磁通量

如图 1.13 所示，流过圆形线圈的电流在线圈中心 O 点所产生的磁场强度，可利用毕奥-萨伐尔定律求得。此时式(1.7)中 Δl 为 $2\pi r$，$\sin\theta$ 为 $\sin(\pi/2)=1$，所以

$$H = \frac{I}{2r} \text{ (A/m)} \tag{1.10}$$

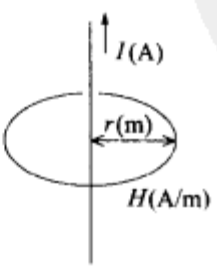


图 1.12 直线电流的磁通量

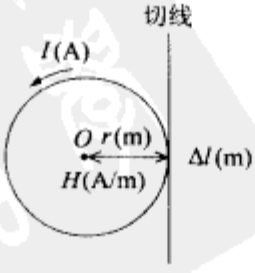


图 1.13 环电流产生的磁通量

环形线圈产生的磁通量

在图 1.14 所示截面的圆环形线圈中，设环的平均半径为 r(m)，流过线圈的电流为 I(A)，线圈的匝数为 N，根据安培环路定律得

$$H\times 2\pi r = IN$$

所以线圈内部的磁场强度 H(A/m)如下：

$$H=\frac{IN}{2\pi r}\ (\mathrm{A/m}) \tag{1.11}$$

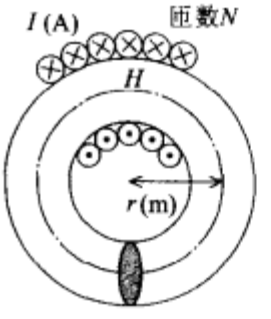


图 1.14　环形线圈内部的磁场

螺线管的磁通量

如果把图 1.15 所示的无限长螺线管看作图 1.14 所示的线圈，其半径为无限大，则可以等同于环形线圈来处理。所以，在式(1.11)中$N/2\pi r$为每米线圈的匝数，设其为 n，则无限长螺线管的磁场强度为

$$H=In\ (\mathrm{A/m}) \tag{1.12}$$

在有限长螺线管的情况下，线圈内部的磁通量是不均匀的，但如果与线圈的直径相比足够长时，也可以等同于无限长螺线管来处理。

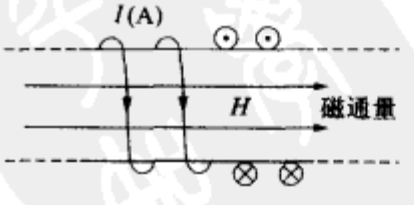


图 1.15　无限长螺线管的磁场

相关知识

◆ 磁通量和磁感应强度

如图 1.16 所示，为说明磁通量大小和方向所确定的量称为磁通量 Φ(Wb)，通过与磁通量垂直的单位面积(m^2)的磁通量称为磁感应强度 B(T)，用以表示磁感应强度大小。

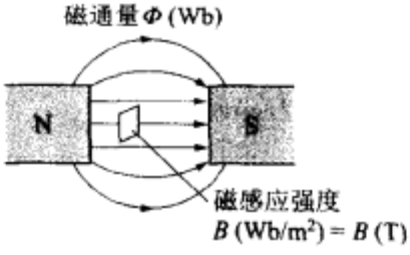


图 1.16 磁通量

◆ 磁导率

在某些场合，如果设磁场强度为 H(A/m)，这时的磁感应强度 B 即为

$$B=\mu H(\mathrm{T}) \tag{1.13}$$

式中 μ 称为磁导率，它表示磁通量通过的难易程度。

真空中的磁导率为

$$\mu_0=4\pi\times10^{-7}(\mathrm{H/m}) \tag{1.14}$$

另外，将某物质的磁导率 μ 与真空中的磁导率相比时，表示其比率的参数称为相对磁导率 μ_r，可用下式表示，即

$$\mu_r=\frac{\mu}{\mu_0} \tag{1.15}$$

例 题

距无限长直导线 1m 处某点的磁场强度为 0.16(A/m)，求流过导体的电流为多少？

答 根据安培环路定律

$$I=H\times2\pi r=0.16\times2\pi\times1=1(\mathrm{A})$$

4　电流受到的磁通量力

要　点

电荷在磁通量中运动，会受到力的作用。也就是说，磁通量中的导体如果有电流流过，则会有力作用于导体，称为电磁力。用弗莱明左手定则可以知道电磁力的作用方向。如果磁感应强度为 B(T)、电流为 I(A)、导体在磁通量中的长度为 l(m)、导体与磁通量的夹角为 θ，则电磁力 F(N)为

$$F = BIl\sin\theta \quad (\mathrm{N})$$

解　释

□ 直线电流所受的力

电磁力

如图 1.17 所示，在磁极之间(磁通量中)悬挂一个导体，如果有电流流过导体，导体就会产生运动。这是由于磁极的磁通量和电流形成的磁通量间相互作用所致，这个力称为**电磁力**。

□ 弗莱明左手定则

弗莱明左手定则

电磁力的作用方向取决于磁通量方向和电流方向，用**弗莱明左手定则**可以知道它们之间的关系。如图1.18所示，互成直角地伸出左手的三个手指，食指即为磁通量方向，中指为电流方向，拇指即为作用力的方向。

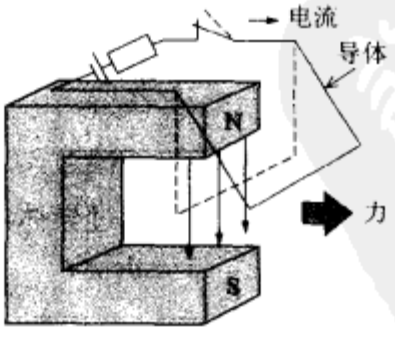


图 1.17　磁通量中电流的受力



图 1.18　弗莱明左手定则

□ 洛伦兹力

洛伦兹力

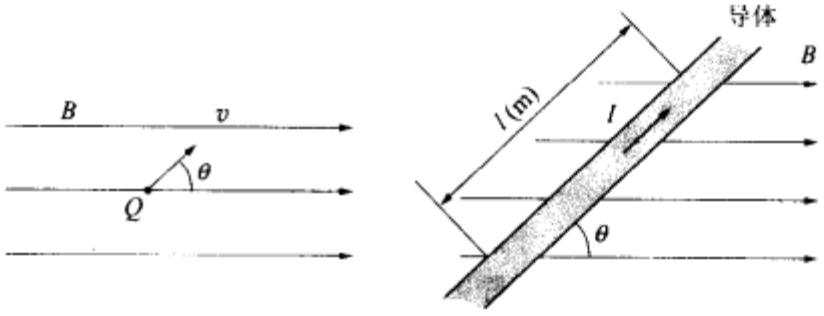
磁通量中有电荷移动(电流)时，电荷受到的力称为**洛伦兹力**。如图1.19所示，在磁感应强度为 B(T)的磁通量中，

电荷 Q(C)以速度 v(m/s)运动时，作用于电荷的力可用下式表示，即

$$F=BQv\sin\theta \ (\mathrm{N}) \tag{1.16}$$

这里由于 Qv 是移动的电荷密度，也就是电流密度。所以如图 1.19(b)所示，导体与磁通量的夹角为 θ，由于电流 I(A)流过磁通量中长度为 l(m)的导体，故所受到的作用力为

$$F=BIl\sin\theta \ (\mathrm{N}) \tag{1.17}$$



(a) 磁场中电荷所受的力　　(b) 磁场中电流所受的力

图 1.19　洛伦兹力

电流单位的定义

如图 1.20 所示，电流流过平行放置的导体时，由于电流产生的磁通量，使导体相互之间受到力的作用。如果流过导体的电流方向相同，导体之间将产生吸引力。电流方向相反时，则相互排斥。

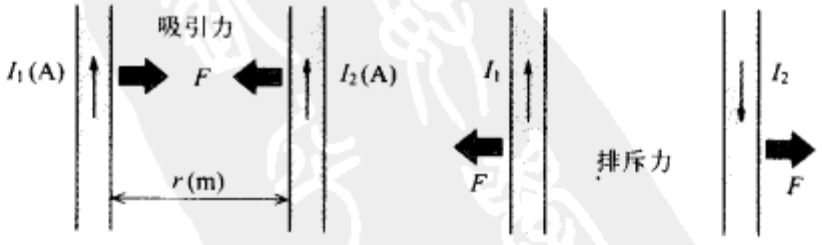


图 1.20　平行导体的受力

磁场强度

由本章第 3 节可知，在距直线电流 I_1 距离为 r 的点上，电流 I_1(A)所产生的**磁场强度** H(A/m)为

$$H=\frac{I_1}{2\pi r} \ (\mathrm{A/m})$$

由于空气中磁通量的磁感应强度 B(T)为

$$B=\mu_0 H=4\pi\times10^{-7}H\ (\mathrm{T}) \tag{1.18}$$

所以流过电流 I_2 的导体每米所受到的力为

$$F=BI_2 l=4\pi\times10^{-7}\times\frac{I_1}{2\pi r}\times I_2$$

$$=\frac{2I_1 I_2}{r}\times10^{-7}\ (\mathrm{N}) \tag{1.19}$$

如果设 $r=1\mathrm{m}$，两个导体流过的电流 I_1、I_2 相等，则有

$$F=2I^2\times10^{-7}\ (\mathrm{N}) \tag{1.20}$$

这样，电流的单位可以定义为：在空气中(真空中)相隔 1m 平行放置的二直线导体流过相等的电流时，每米导体受到 2×10^{-7}N 作用力时的电流大小为 1A。

矩形线圈的转矩

如图 1.21(a)所示，在均匀磁感应强度 B(T)的磁通量中放置边长为 a(m)、b(m)的矩形线圈，流过电流 I(A)时线圈受到的作用力 F(N)为

$$F=BIa\ (\mathrm{N})$$

因而，如图 1.21(b)所示，磁通量方向与线圈平面的夹角为 θ 时，线圈的转矩即为

$$T=2\cdot F\cdot\frac{b\cos\theta}{2}$$

$$=BIab\cos\theta\ (\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}) \tag{1.21}$$



(a) 矩形线圈所受的力　　(b) 矩形线圈受到的转矩

图 1.21　矩形线圈的转矩

应用知识

电动机

由于电磁力的作用，电能可以转换为机械能。以此为目的的电器即有电动机。如图 1.22 所示，直流电动机是给磁铁（磁极）所包围的线圈输入电流而输出电磁力所产生的转矩。

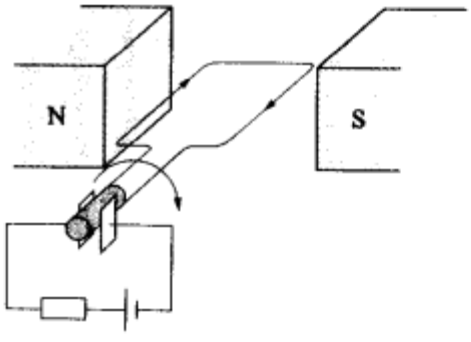


图 1.22　直流电动机的原理

直线电机列车

直线电机

一般的电机是做旋转运动，而在平面上做直线运动的电机则称为**直线电机**。直线电机的原理，如同将旋转型电机剖开后展开在一条直线上。

直线电机作为铁路列车的驱动器已经在东京都营地铁的大江户线路上得到了实际应用。其一次线圈安装于车辆的底下，而在路面上两条铁轨的中间铺设着作为电机二次线圈的导体（感应板），车辆靠着它们之间的电磁力来驱动。

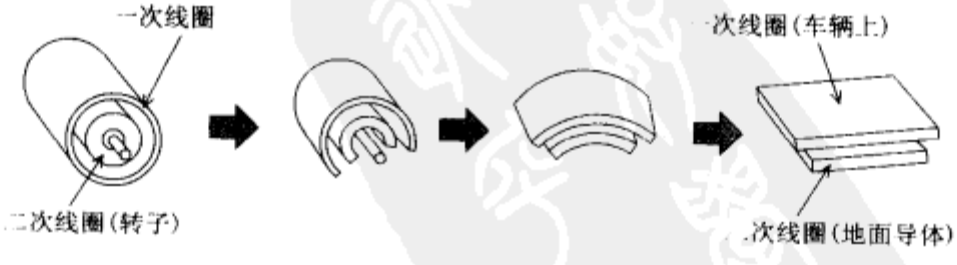


图 1.23　直线电机的原理

5　电磁感应

要　点

线圈磁通量交链时，不论是线圈运动或是磁通量变化，线圈中都会产生电动势。这个现象称为电磁感应。从法拉第定律可求出电动势的大小，从楞次定律和弗莱明左手定则可确定电动势的方向。

解　释

电磁感应

电磁感应
感应电动势

如图 1.24 所示，如果将磁铁从线圈中拉出或者插入，与线圈连接的检流计指针就会摆动。这是由于磁铁与线圈交链的磁通量变化在线圈中产生了电动势。这种现象称为**电磁感应**，其电动势称为**感应电动势**。如果磁铁固定而线圈运动，同样也会产生电动势。从以上实验可以得到以下的结论：

① 交链的磁通量发生变化时产生电动势，它包括磁通量本身发生变化或者是导体切割磁力线两种情况。

② 当相互交链的磁通量增加或者减少时，所产生的电动势方向相反。

③ 交链的磁通量变化越快，所产生的电动势也就越高。

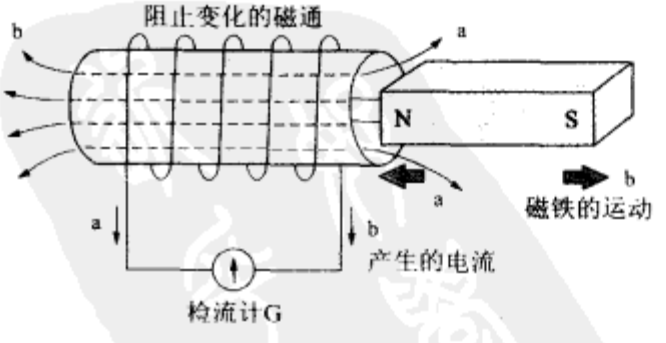


图 1.24　电磁感应

法拉第定律

法拉第定律

电磁感应产生感应电动势的大小，与交链的磁通量变化率成正比，这就是**法拉第定律**。在 Δt(s) 内磁通量变化 $\Delta\Phi$(Wb)时，电动势 e(V) 为

$$e=-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V}) \tag{1.22}$$

式(1.22)中负号的意义是，相互交链的磁通量变化时，产生电动势的方向总是向着阻碍磁通量变化的方向。

楞次定律

楞次定律

如图 1.25 所示，“电磁感应所产生的电动势的方向，是使它所产生的磁通量向着阻碍原磁通量变化的方向”，即为**楞次定律**。



(a) 磁通量增加　　(b) 磁通量减少

图 1.25　楞次定律

弗莱明右手定则

弗莱明右手定则

用磁通量方向和导体运动方向来表示感应电动势方向的法则称为**弗莱明右手定则**。如图 1.26 所示，互成直角地伸出右手的三个手指，食指表示磁通量方向，拇指表示导体运动方向，中指即为感应电动势的方向。



图 1.26　弗莱明右手定则

6　自感与自感系数

要　点

流过线圈的电流发生变化时，线圈本身就会产生电动势，此称为自感。表示自感作用大小的量称为自感系数，它取决于线圈的匝数和形状。

解　释

□ 自　感

自感

如图 1.27 所示，如果流过匝数为 N 的线圈的电流在 Δt 内变化 ΔI(A)，所产生的磁通量变化为 $\Delta\Phi$(Wb)，则线圈本身会产生阻碍磁通量变化的电动势 e(V)。这种现象称为**自感**。产生的电动势的大小可用式(1.23)表示：

$$e=-N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\ (\mathrm{V}) \tag{1.23}$$

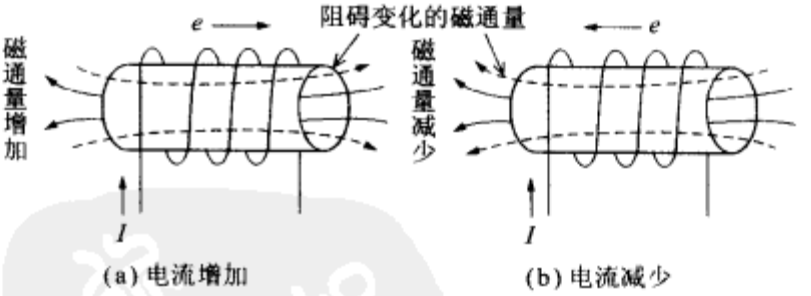


图 1.27　自　感

式(1.23)中由于磁通量的变化 $N\Delta\Phi$ 与电流的变化 ΔI 成正比，所以，

$$e=-L\frac{\Delta I}{\Delta t}\ (\mathrm{V}) \tag{1.24}$$

自感系数

式中 L 称为**自感系数**(简称自感或电感)，表示自感作用的大小，单位为亨[利](H)。在磁通量和电流成比例的范围内，可用下式表示自感，即

$$L=\frac{N\Phi}{I}\ (\mathrm{H}) \tag{1.25}$$

□ 环形线圈的自感

在图 1.28 所示的环形线圈中，设线圈的磁导率为 μ，截

面积为$A(m^2)$，则

$$\Phi = BA = \mu HA$$

因 $H = IN/l$，故自感可表示为

$$L = \frac{N\Phi}{I} = \mu \frac{AN^2}{l} \text{ (H)} \tag{1.26}$$

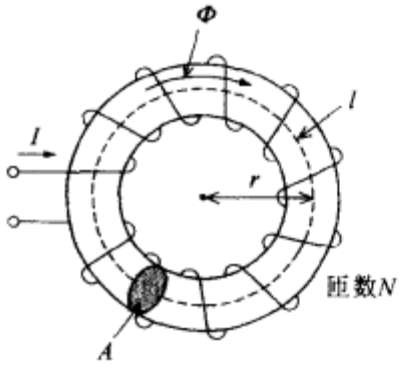


图 1.28 环形线圈的自感

螺线管的自感

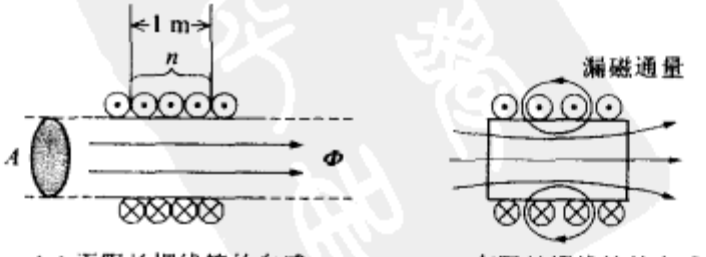
在图 1.29(a)所示的无限长螺线管中，线圈内部为均匀磁通量，设每米线圈的匝数为 n，线圈的磁导率为 μ，截面积为 $A(m^2)$，则每米线圈的自感为

$$L = \frac{n\Phi}{I} = \mu n^2 A \text{ (H)} \tag{1.27}$$

如图 1.29(b)所示，在有限长螺线管的情况下，由于漏磁通量的影响，螺线管内的磁通量不均匀。因而式(1.26)乘以实验得到的系数 k（**长度系数**），即可得到

长度系数

$$L = k\mu \frac{A}{l} n^2 \text{ (H)} \tag{1.28}$$



(a) 无限长螺线管的自感　　(b) 有限长螺线管的自感

图 1.29 螺线管的自感

7　互感与互感系数

要　点

两个线圈相互邻近时，如果一个线圈流过电流，另一个线圈就会产生电动势，称为互感。衡量互感作用大小的量，称为互感系数，它取决于两个线圈的匝数与形状。

解　释

互　感

如图 1.30 所示，相互邻近的两个线圈，如果一个线圈（一次线圈）中流过的电流发生变化，与另一个线圈（二次线圈）交链的磁通量也会发生变化。于是由于电磁感应而在二次线圈中产生电动势。该现象称为**互感**。

互感

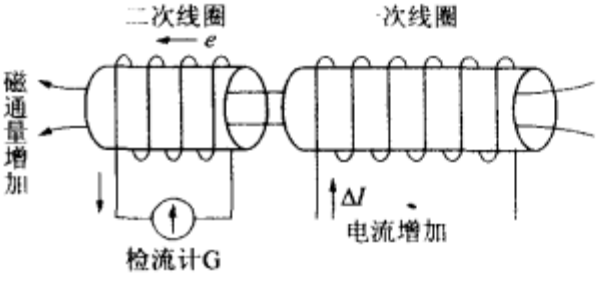


图 1.30　互　感

如果 Δt 时间内一次线圈流过的电流变化为 ΔI，由于互感的作用，二次线圈产生的感应电动势 e 可用下式表示，即

$$e=-M\frac{\Delta I}{\Delta t}\ (\mathrm{V}) \tag{1.29}$$

互感系数

式中 M 称为**互感系数**（简称互感），它取决于各线圈的匝数、形状、相互间的位置及周围的媒质，互感系数的单位也是亨[利]（H）。

环形线圈的互感

如图 1.31 所示，在同一环形铁心上卷绕匝数为 N_1、N_2 的两个线圈，设磁路的平均长为 l（m），线圈的截面积为 A（m^2），铁心的磁导率为 μ，则可用下式表示互感，即

$$M=\mu\frac{A}{l}N_1N_2\ (\mathrm{H}) \tag{1.30}$$

自感与互感的关系

例如，在图 1.31 的情况下，两个线圈的自感 L_1、L_2 与互感 M 之间的关系为

$$M=k\sqrt{L_1L_2}\ (\mathrm{H}) \tag{1.31}$$

耦合系数

式中 k 称为**耦合系数**，它表示两个线圈的耦合程度。如果 $k=1$，则表示无漏磁通量，耦合关系最为紧密。

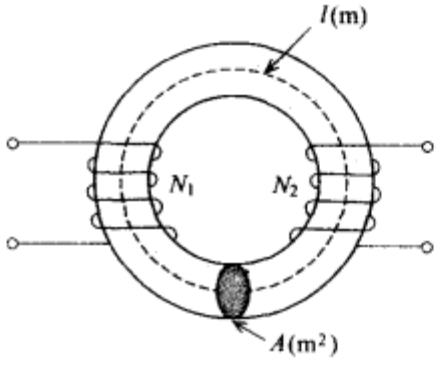


图 1.31　环形线圈的互感

电感的连接

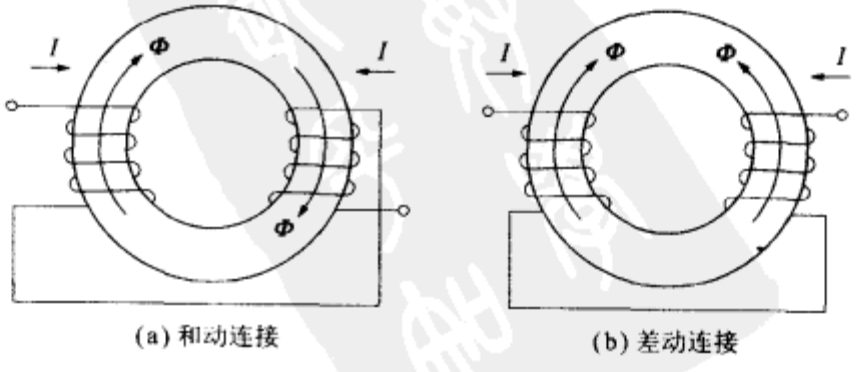
如图 1.32 所示，根据两线圈的连接方法，它们所产生的磁通量方向可有同向和反向两种。图 1.32(a)称为**和动连接**，图 1.32(b)称为**差动连接**。由于连接方式不同，合成的电感 L_a、L_b 也不同，可分别表示为

和动连接

差动连接

$$L_a=L_1+L_2+2M\ (\mathrm{H}) \tag{1.32}$$

$$L_b=L_1+L_2-2M\ (\mathrm{H}) \tag{1.33}$$



(a) 和动连接　　(b) 差动连接

图 1.32　电感的连接

8　线圈可储存磁能

要　点

线圈具有以磁能形式存储电能的能力。用磁滞回线可以理解磁性体磁化储能的过程。

解　释

磁　能

如图 1.33 所示，在含有线圈的电路中，如果打开原来闭合的开关，则在开关断开的一瞬间，线圈的两端就产生高电压。这是由于要产生一个企图阻止线圈电流减少的电动势。即从电源供给的能量将以磁能形式储存下来。设线圈的电感为 L(H)，电流为 I(A)，则磁能 W 可用式(1.34)表示，即

$$W=\frac{1}{2}LI^2 \quad (\mathrm{J}) \tag{1.34}$$

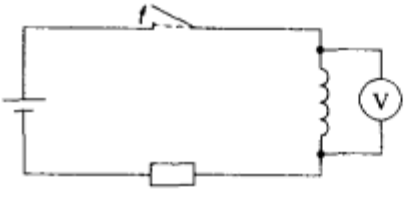


图 1.33　线圈储存的磁能

物质的磁化

磁化曲线（*B-H* 曲线）

如图 1.34 所示，在无磁性的铁心上卷绕线圈，如果流过电流，铁心就有了磁性。这就表示线圈产生的磁通量使铁心磁化。图1.35表示所加的磁场强度 H 与被磁化物体磁感应强度 B 之间的关系，该曲线称为**磁化曲线(*B-H* 曲线)**。

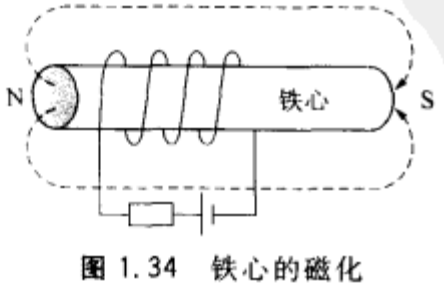


图 1.34　铁心的磁化

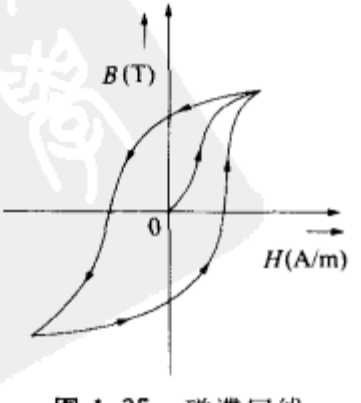


图 1.35　磁滞回线

铁之类的物质一旦被磁化，即使再减少所加的磁通量，也不能得到同样的磁化曲线。图 1.35 所示的这种性质的曲线称为**磁滞回线**。这个闭合环（闭合回路）所围成的面积与该物质从磁通量获得的能量成正比。

磁滞回线

磁性体

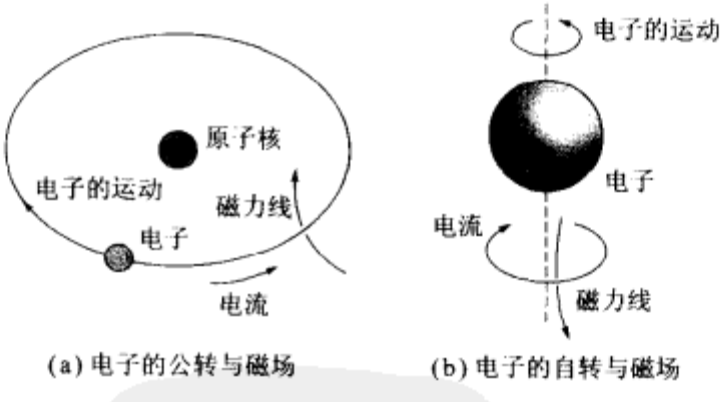
磁性体

强磁性体

被磁化的物质（见图 1.34 所示的铁心）称为**磁性体**。特别是铁、钴、镍等物质易于被强磁化，称为**强磁性体**。

由进一步分析可知，物质的磁化与其内部的电子状态有关。如图 1.36 所示，原子是由原子核及绕原子核旋转的电子所组成。由于电子的运动形成电流，故该电子公转的轨道可看成是流过电流的导线，所以它的公转就产生了磁通量。另外，电子还有自转（**自旋**）运动，如图 1.36(b)所示，该运动也会产生磁通量。

自旋



(a) 电子的公转与磁场　　(b) 电子的自转与磁场

图 1.36　物质内部的电子运动

9　静电与库仑定律

要　点

由摩擦等方法获得的电荷一般称为静电。静电具有吸引作用和排斥作用。根据库仑定律可以知道它们之间作用力的大小。

解　释

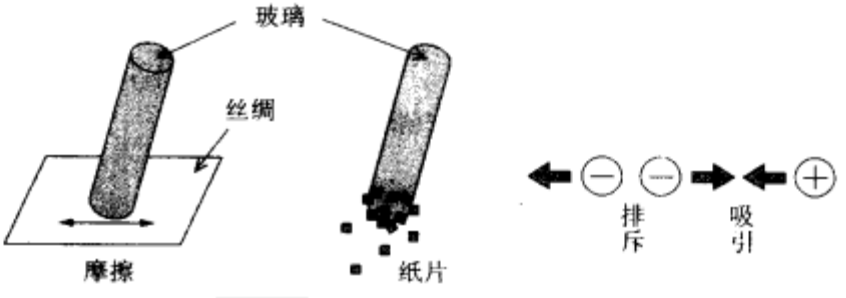
静　电

如图 1.37(a)所示，物体之间相互摩擦使物体具有多余电荷的现象称为带电。带电物体称为带电体。带电体所带电荷不像电流那样运动，而是处于静止状态，所以称为**静电**。

静电

静电力

静电荷之间存在作用力，称为**静电力**。如图 1.37(b)所示，作用力的方向，在同种电荷间为相互排斥，异种电荷间为相互吸引。



(a) 带电　　(b) 静电力的方向

图 1.37　静电

库仑定律

如图 1.38 所示，两个电荷之间的作用力 F 与两个电荷量 Q_1(C)和 Q_2(C)的乘积成正比，与两电荷间距离的平方 r^2 成反比，这就是关于静电的**库仑定律**，可用式(1.35)表示，即

库仑定律

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\times\frac{Q_1Q_2}{r^2}\ (\mathrm{N}) \tag{1.35}$$

式中 ε 称为**介电常数**，随电极间物质的不同而不同。在真空(空气)中为

介电常数

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\ (\mathrm{F/m})$$

此时静电力为

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 Q_2}{r^2}\ (\mathrm{N}) \tag{1.36}$$

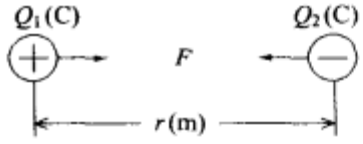


图 1.38 库仑定律

相关知识

◆ 万有引力定律

如图 1.39 所示，质子和电子的质量约分别为 1.67×10^{-27} kg 和 9.11×10^{-31} kg，其间的距离约为 5.29×10^{-11} m（此即玻尔半径），质子与电子间的万有引力 F 则为

$$F = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$= 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 9.11 \times 10^{-31}}{(5.29 \times 10^{-11})^2} = 3.63 \times 10^{-47}\ (\mathrm{N})$$

另一方面，质子和电子所带的电荷为 1.60×10^{-19} C，其间作用的静电力为

$$F = 9 \times 10^9 \times \frac{1.67 \times 10^{-19} \times 1.60 \times 10^{-19}}{(5.29 \times 10^{-11})^2} = 8.23 \times 10^{-8}\ (\mathrm{N})$$

可见，静电力的大小约为万有引力的 2.27×10^{39} 倍之大，因而在原子世界里，万有引力小得可忽略不计。

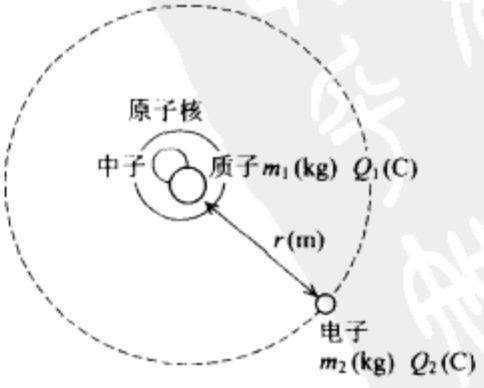


图 1.39 万有引力

应用知识

静电力的利用

自然现象中的静电，存在着在家具、装饰品上吸附灰尘的现象，这是令人非常讨厌的事情。但这个性质也可用于空气净化器的集尘。复印机的复印原理也是利用静电。它是先将着色剂附着在磁鼓上，然后再转印到复印纸上。在产业技术方面亦有应用，如静电喷涂已被广泛应用。

10　电场与电位

要　点

静电力作用的空间称为电场。用电场中使电荷逆电场移动所做的功来表示电位。电场中不同的点具有不同的电位，两点之间电位的差，称为电位差。

解　释

电场中电荷所受的力

在电荷的周围如有其他电荷接近，根据库仑定律，将存在静电力的作用。如图 1.40 所示，距离电荷 Q 为 r(m)的 P 点放置+1C 的电荷，由库仑定律可以得知电荷受到的静电力为

$$F=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\times\frac{Q}{r^2}\ (\mathrm{N}) \tag{1.37}$$

电场

像这样在电荷周围存在的静电力的作用空间，称为**电场**。电场强度 E(V/m)是 1C 电荷所受到的静电力，可表示为

$$E=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\times\frac{Q}{r^2}\ (\mathrm{V/m}) \tag{1.38}$$

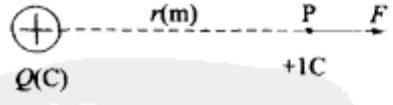


图 1.40　电场中的电荷

功和能

如图 1.41 所示，将+1C 的电荷从不受电荷 Q 电场影响的无限远处移近，就需要逆静电力做功。在图 1.41 中，为使+1C 的电荷移到 A 点比移到 B 点所做的功要多。这是因为在 A 点将储存更多的能量。这就是说，A 点比 B 点的电位高。两点之间电位的差值称为**电位差**。图 1.41 中，电荷 Q 在 A 点产生的电位可用式(1.39)表示，即

电位差

$$V=\frac{1}{4\pi\varepsilon}\times\frac{Q}{r}\ (\mathrm{V}) \tag{1.39}$$

电位和电位差的单位均为伏[特](V)，也就是说，电路

中的电位差(电压)和电场中的电位差本质是相同的。

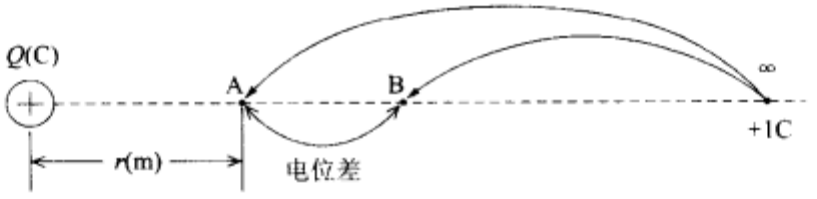


图 1.41　电位和电位差

相关知识

◆ 电荷量和电位移

为说明磁通量的情况采用了“磁通量”的概念，同样，为说明电场的情况，也有如图1.42所示的电荷量。电荷量从正电荷出发，终止于负电荷。从电荷 $+Q$ (C)发出的电荷量为 Q(C)。

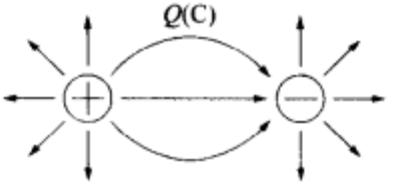


图 1.42　电场和电荷量

可用电位移 D(C/m^2)表示电场强度，它表示在垂直于电场的每平方米面积上所通过的电荷量量。电位移可表示为

$$D=\varepsilon E \ (\mathrm{C/m^2}) \tag{1.40}$$

这里 ε 称为介电常数，表示电荷量通过的难易程度。真空中的介电常数 ε_0 为

$$\varepsilon_0=8.854\times10^{-12} \ (\mathrm{F/m})$$

某物质的介电常数与真空中的 ε_0 的比值称为相对介电常数 ε_r，可表示为

$$\varepsilon_r=\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \tag{1.41}$$

11　电容器的电容

要　点

电容器是储存电荷的器件。储存电荷的能力称为静电电容(电容),多个电容器连接时,串联和并联所合成的总电容量是不同的。

解　释

几何尺寸与电容

如图 1.43(a)所示,两个导体分别带有电荷 $+Q$(C)和 $-Q$(C),如果导体之间的电位差为 V(V),则电荷和电位差之间存在以下关系:

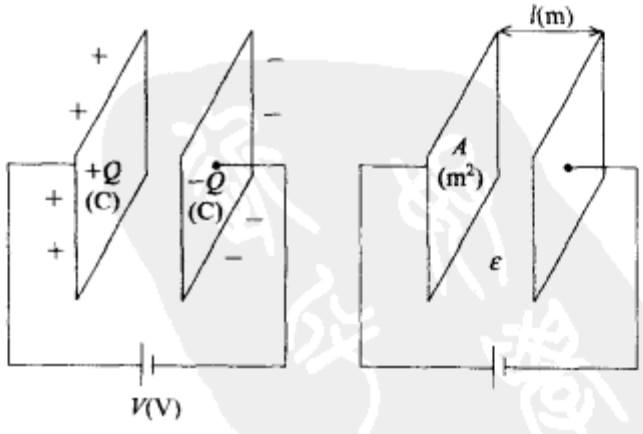
$$Q=CV \ (\mathrm{C}) \tag{1.42}$$

电容

式(1.42)中的 C 称为**电容**,单位为法[拉](F),表示储存电荷的能力。

图 1.43(b)所示是平行板电容器,设导体的面积为 A (m^2),导体间的距离为 l(m),介电常数为 ε,则电容 C 可表示为

$$C=\varepsilon\frac{A}{l}=8.854\times10^{-12}\times\varepsilon_r\frac{A}{l} \ (\mathrm{F}) \tag{1.43}$$



(a) 导体间的电位与电荷　　(b) 几何尺寸与电容

图 1.43　电　容

串　联

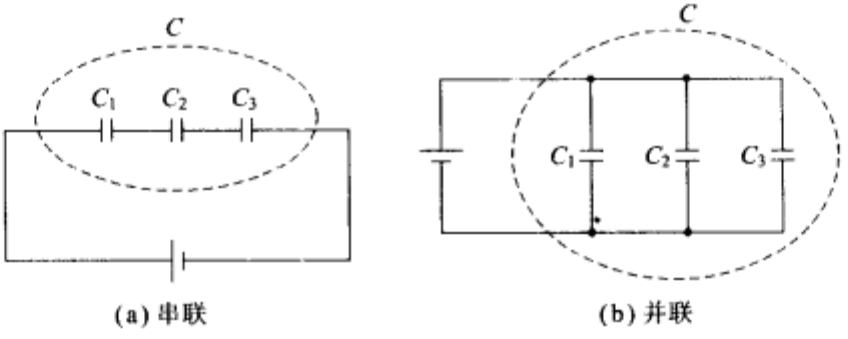
在图 1.44(a)所示的情况下,合成电容为

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_3} \tag{1.44}$$

并　联

在图 1.44(b)所示的情况下，合成电容 C 为

$$C=C_1+C_2+C_3 \tag{1.45}$$



(a) 串联　　(b) 并联

图 1.44　电容器的连接

例　题

图 1.45 中 C_1 储存 2.4×10^{-3}C 的电荷，C_2 储存 3×10^{-4}C 的电荷，求 a、c 间的合成电容为多少？

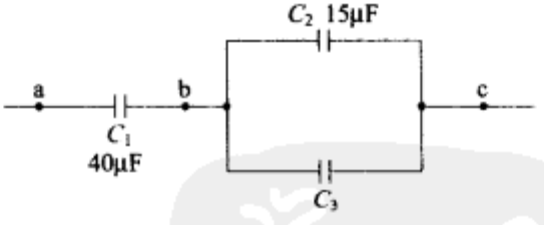


图 1.45　电容的合成

答　由于 a、b 间和 b、c 间储存的电荷相等，C_3 储存的电荷 Q_3 为

$$Q_3=2.4\times10^{-3}-3\times10^{-4}=2.1\times10^{-3}\ (\mathrm{C})$$

由于 C_2、C_3 储存的电荷与各自的电容成比例，从 $C_3:C_2=Q_3:Q_2$ 可得 $C_3=105\mu\mathrm{F}$。所以合成电容为

$$C=\frac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2+C_3}}=30\mu\mathrm{F}$$

12　电容器储存电能

要　点

由于电容器能储存电荷，所以它可以储存电能。为高效地储存电荷，电容器的极板之间必须插入电介质。电介质是利用电介质极化在其表面产生电荷的物质。

解　释

充电
放电
静电能

静电能

把电容器储存电荷的过程称为**充电**，把放出电荷的过程称为**放电**。由于电容器能储存电荷，所以可以储存电能。这种能量称为**静电能**。

设电容器的电荷为 Q，此时的电压为 V，如图 1.46 所示，它所储存的电能可表示为

$$W=\frac{1}{2}VQ=\frac{1}{2}CV^2\ (\mathrm{J}) \tag{1.46}$$

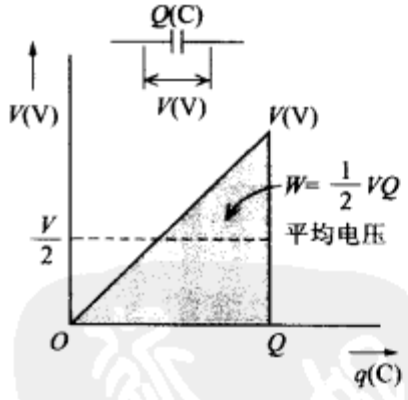


图 1.46　电容器的充电

电介质极化

如图 1.47 所示，在绝缘体两端加电压，绝缘体的分子则极化为正、负端。它作为一个整体，呈电中性，但在两个端部将出现电荷。这种现象称为**电介质极化**。

电介质极化

电介质

分析两电极之间有绝缘体的电容器（见图 1.47），为了抵消绝缘体的极化电荷，电极上就会产生电荷。也就是说，

电介质

为了增大电容器的电容，可以在电极间插入极化强度大的绝缘体。绝缘体可以储存电荷，从而使得电位移增大，所以又叫**电介质**。

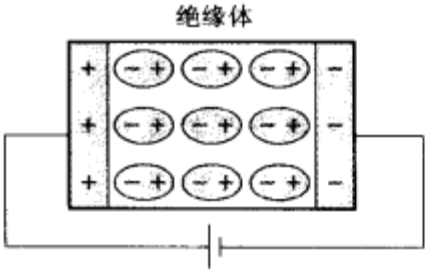


图 1.47　电介质极化

相关知识

◆ 电介质的相对介电常数

表 1.1 列出了各种物体的相对介电常数。

表 1.1　相对介电常数 ε_r

物质	ε_r	物质	ε_r	物质	ε_r
氢	1.000 26	纸	2.0～2.6	水	81
空气	1.000 58	木	2.5～7.7	氧化钛	83～183
石蜡	1.9～2.3	玻璃	3.5～9.9	钛酸钡	1000～5000

引自电气学会编《袖珍电工学手册》(1987)等。

应用知识

微波炉

给电介质加上电压，如果电场强度及方向不断发生变化，电介质分子中的电子、原子等将随电场的变化而振动，使一部分电能变成热能，称为介质损耗。微波炉就是基于这个原理，使用频率为 2450MHz 的微波，用磁控管来加热物体。

特殊电介质

像玻璃和丝绸摩擦产生静电一样，对强磁性体施加压力或张力也会发生极化，使表面产生电荷。这种现象称为压电现象，它可以用于产生点火用的火花，如图 1.48 所示。

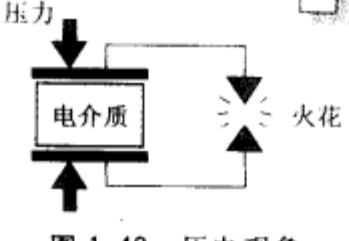


图 1.48　压电现象

13 直流电路的 R、L、C

要 点

影响直流电路的主要元件是电阻 R。可以用欧姆定律表示电阻与电流、电压之间的关系。多个电阻连接时的合成电阻，会因为串、并联的不同而不同。

解 释

直流电

如图 1.49 所示的曲线，其方向和大小均不随时间变化而变化的电流称为**直流电**。

直流电

电源与负载

图 1.50 中的灯泡发光，是由于电池与灯泡连接起来有电流通过。电池的作用是产生电动势，具有电动势的装置称为**电源**。如果让灯泡持续亮着，不久亮度就会降低，继而熄灭。这是因为电池的电能被灯泡消耗了。这种消耗电能的装置称为**负载**。

电源

负载

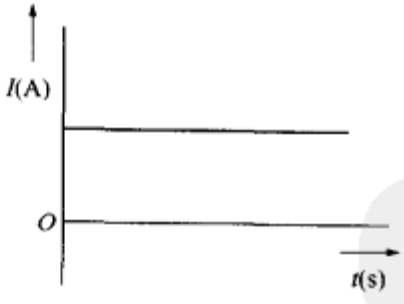


图 1.49 直流电流

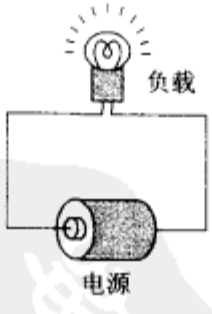


图 1.50 电源和负载

流过 R、L、C 的电流

在电路中，负载可以是电阻 R、线圈等的电感 L 和电容器的电容 C。如果给 R、L、C 分别加上一定的电压，流过的电流则如图 1.51所示。

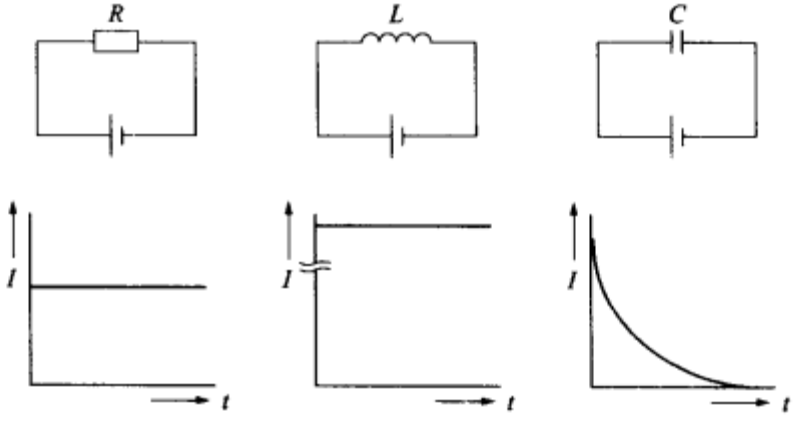
如图 1.51 所示，电阻在电路中起负载的作用。线圈的 L 与不影响电流通过的导线作用完全相同。电容器 C 仅在瞬间流过电流，电容器充电终了，电流也就停止了，故可以说

电容器中无直流电流通过。因而在直流电路中，作为负载只需考虑电阻 R。

欧姆定律和电阻的连接

图 1.52 中，设电压为 V，电流为 I，电阻为 R，三者有以下的关系：

$$V=RI\ (\mathrm{V}),\ I=\frac{V}{R}\ (\mathrm{A}),\ R=\frac{V}{I}\ (\Omega) \qquad (1.47)$$



(a) 电阻R　　(b) 电感L　　(c) 电容C

图 1.51　R、L、C 中的直流电流

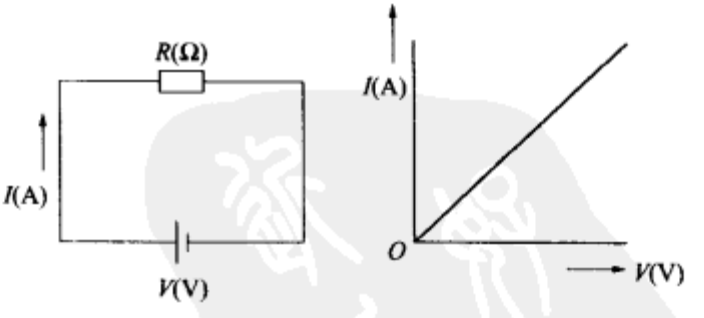


图 1.52　欧姆定律

可以看出，流过电路的电流与电压成正比，与电阻成反比，这称为**欧姆定律**。

欧姆定律

电阻的连接方法可有图 1.53(a)所示的串联方式、图 1.53(b)所示的并联方式以及如图 1.53(c)所示的串并联方式。

串联电路的合成电阻

在图 1.53 所示的由多个电阻连接起来的电路中，将它

们合并后的总电阻称为合成电阻。

如图 1.53(a)所示，电阻串联时，由于电阻 R_1、R_2(Ω)通过的电流 I(A)是相同的，所以

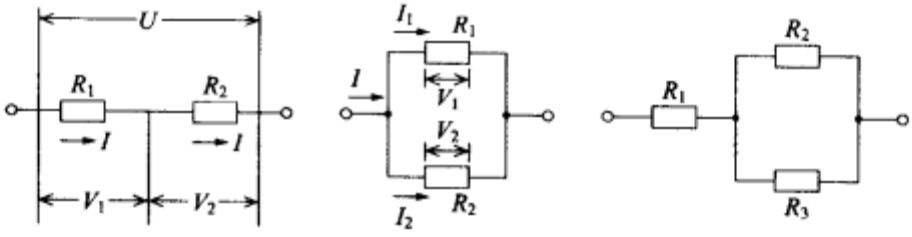
$$V=V_1+V_2=R_1I+R_2I=(R_1+R_2)I=RI$$

所以它们的合成电阻为

$$R=R_1+R_2$$

当 n 个电阻串联时，合成电阻可表示为

$$R=R_1+R_2+\cdots+R_n \tag{1.48}$$



(a) 串联　　(b) 并联　　(c) 串并联

图 1.53　电阻的连接

并联电路的合成电阻

图 1.53(b)所示的并联电阻，由于电阻 R_1、R_2 上所加的电压相同，所以

$$I=I_1+I_2=\frac{V}{R_1}+\frac{V}{R_2}=\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)V=\frac{1}{R}V$$

故合成电阻 R 可用下式表示：

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

当多个电阻并联时，合成电阻 R 与各个电阻之间的关系可用下式表示：

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n} \tag{1.49}$$

相关知识

◆ 倍率器与分流器

测量电压和电流时，为扩大其量程所连接的电阻分别称为倍率器和分流器。

在图 1.53(a)中，设 R_1 为电压表的内电阻，与之串联的电阻 R_2 即为倍率器。用倍率器可对全电压进行分压，可用于调节加在 R_1 上的电压。倍率器的倍率可表示为

$$m=1+\frac{R_2}{R_1} \tag{1.50}$$

所谓分流器可如图 1.53(b)所示，设 R_1 为电流表的内阻，与之并联的电阻器 R_2 即为分流器。用分流器进行分流，可以调节流过 R_1 的电流大小。分流器的倍率为

$$n=1+\frac{R_1}{R_2} \tag{1.51}$$

例 题

图 1.54 中，合上开关 S 时的电流 I 为断开开关 S 时电流的 1.2 倍，求电阻 R 的值。

答 设开关 S 闭合时的电流与合成电阻分别为 I_1、R_1，开关 S 打开时的电流与合成电阻分别为 I_0、R_0，则

$$I_1=1.2I_0 \tag{1.52}$$

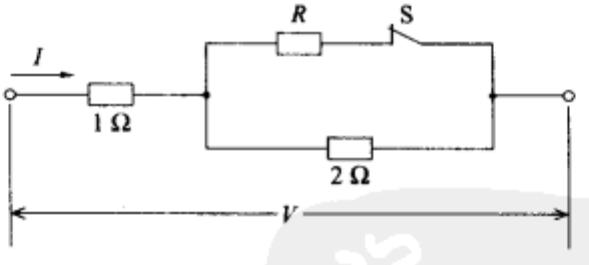


图 1.54　电阻的串并联

根据欧姆定律

$$I_1=\frac{V}{R_1},\ I_0=\frac{V}{R_0}=\frac{V}{1+2}$$

将以上两式代入式(1.52)，得 $R_1=2.5\Omega$。所以

$$\frac{1}{2.5-1}=\frac{1}{R}+\frac{1}{2}$$

求得：　$R=6\Omega$

14 交流电

要 点

交流电就是电流或电压的大小和方向均为变化的电流，它可用“大小、波形、变化速度、相位”等四要素来表示。如果其中“波形”和“变化速度”均不变时，可用向量表示交流电，表示方法与计算方法都很方便。

解 释

交流电

交流电

如上节所述，大小和方向均不随时间的变化而变化的电流称为直流电，而在图 1.55(a)～(e)所示图形中，电流的大小和方向等均随时间而变化的则称为**交流电**。

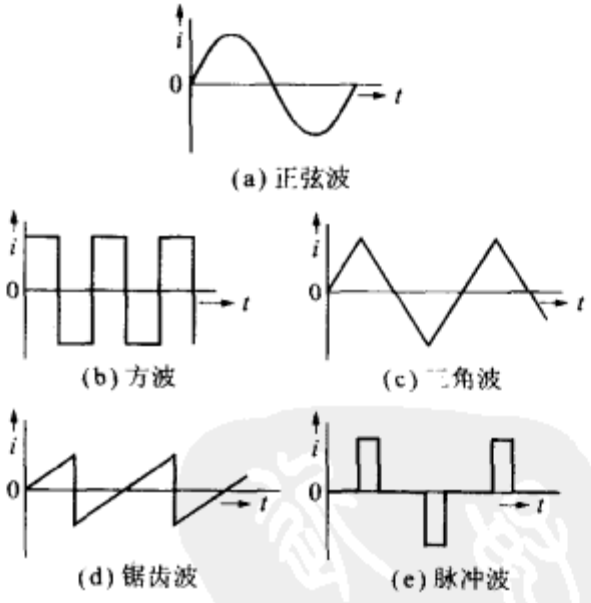


图 1.55 交流电的波形

正弦交流电
非正弦交流电
畸变波交流电

在交流电中，图 1.55(a)所示的交流波形称为**正弦交流电**，图 1.55(b)～(e)所示的波形总称为**非正弦交流电**，或称**畸变波交流电**。非正弦交流电如图 1.56 所示可以分解为若干个大小和相位不同的正弦交流电。为了分析交流电，研究正弦交流电的性质是最基本的内容。

交流电的大小(1)——瞬时值和最大值

由于交流电中电流和电压的大小是随时变化的，所以表

瞬时值

示其大小的方法就有多种。图 1.57 是正弦交流电瞬时值曲线。**瞬时值**就是某时刻的大小，它表示电流和电压随时间的变化状况。用 e、v、i 等小写字母表示。最大值 E_m 是瞬时值的最大值，峰峰值 $E_{p\,p}$ 表示瞬时值中正最大值到负最大值之间的差值。

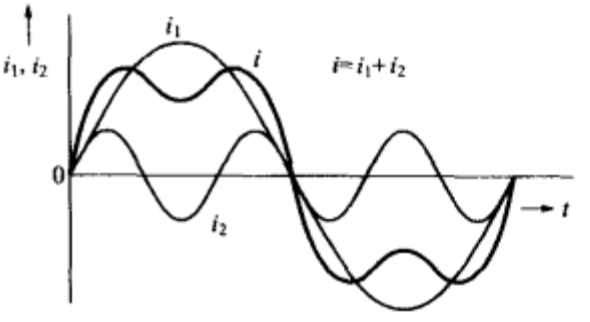


图 1.56　非正弦交流电的分解

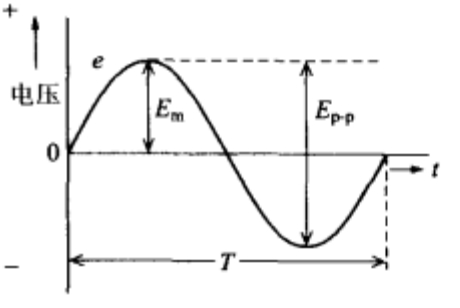


图 1.57　正弦交流电的波形

周期
频率

波形重复一次所需的时间称为**周期**(T)，每秒的周期数称为**频率** f。所以周期与频率的关系为

$$T=\frac{1}{f}\ (\mathrm{s}),\quad f=\frac{1}{T}\ (\mathrm{Hz}) \tag{1.53}$$

交流电的大小(2)——平均值、有效值

平均值

平均值 E_a 是半个周期内瞬时值的平均值，在图 1.58 中可用(A 的面积)/(半周期)求得。在正弦交流电的情况下，平均值 E_a 和最大值 E_m 有以下的关系，即

$$E_a=\frac{2}{\pi}E_m \tag{1.54}$$

有效值

有效值 E 表示与直流电具有同样做功能力的交流值，可用 $\sqrt{[\text{瞬时值平方的平均值}]}$ 求取。在正弦交流电的情况

下进行计算，有效值与最大值之间的关系为

$$E=\frac{E_m}{\sqrt{2}} \tag{1.55}$$

交流电的大小一般用有效值来表示。例如，家庭中使用的插座电压为 100V(220V)，就表示正弦交流电压的有效值为 100V(220V)。从式(1.55)可知，其最大值为 141V(311V)，从式(1.54)可知，其平均值为 90V(198V)。

注：中国与日本不同，本小节括号中的数值为译者标注的中国家电数据。

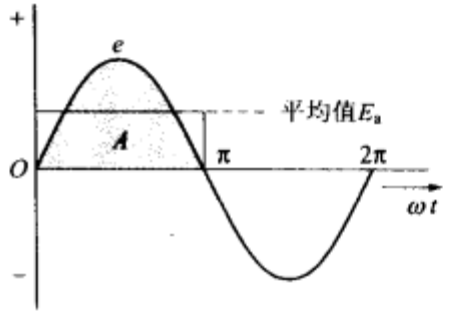


图 1.58 交流电的平均值

大小和相位

对于交流电，除频率所表示的“变化速度”、正弦波那样的“波形”、最大值等所表示的“大小”之外，还有“相位”。

相位

相位差

相位是表示波形的位移。如图 1.59 所示，e_1 和 e_2 有时间差，波形有错位。这种时间的位移称为**相位差**。可以说 e_1 比 e_2 超前 φ(rad)，也可以反过来说 e_2 比 e_1 滞后 φ(rad)。

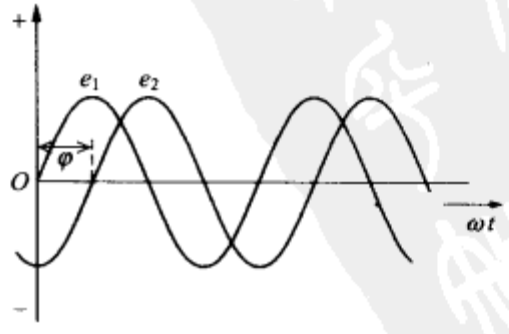


图 1.59 两个波形的相位差

在一般电路中，多数情况下，频率和波形不变。可以只考虑大小和相位两个因素。

用相量表示正弦交流电

在大多数情况下处理交流电的问题可以只考虑大小和相位两个因素，所以可用相量来表示正弦交流电，即用相量的大小表示交流电的大小，用相量的方向表示交流电的相位。这样，可以将复杂交流电的计算进行简化，用相量图表示是很方便的。如图 1.60 所示，为了用相量表示交流电，可以采用相量图法和相量计算式表示法。另外，在用相量表示交流电时，规定用有效值表示交流电的大小。

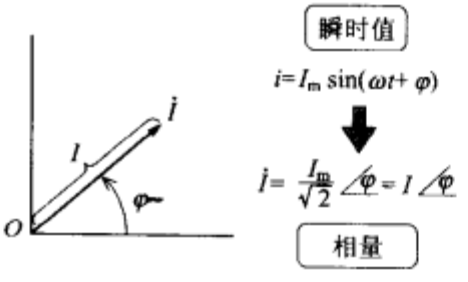


图 1.60　交流电的相量图

15　交流电的复数表示法

要　点

在交流电计算中，如果直接用瞬时值的表示式来处理正弦交流电问题，就得用三角函数，这是非常复杂的。另外，对于复杂的电路如果用前一节列举的相量图来处理也是非常麻烦的事。而用复数表示交流电，使运算变成了代数运算，这就容易得多了。

解　释

大小与相位的表示法

复数
实部
虚部

设 a、b 为实数，$j(=\sqrt{-1})$ 为虚数，$A=a+jb$ 形式所表示的数为**复数**。式中 a 为**实部**，b 为**虚部**。如图 1.61 所示，如果用横轴表示实部，纵轴表示虚部，复平面上的点可以表示 $A=a+jb$。这里的 $|A|$ 称为复数的模或者幅值，它表示交流电的大小。

$$|A|=\sqrt{a^2+b^2} \tag{1.56}$$

θ 称为复数的幅角，表示交流电的相位。

$$\theta=\arctan\frac{b}{a} \tag{1.57}$$

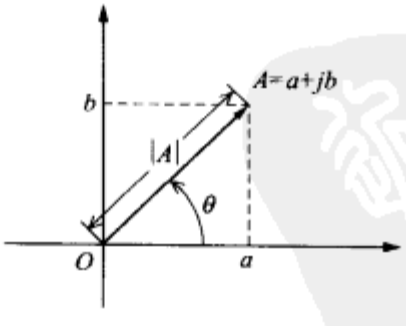


图 1.61　复数表示法

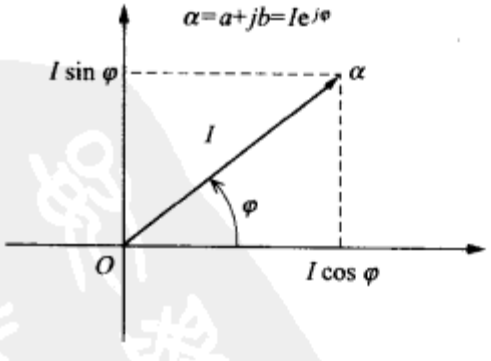


图 1.62　正弦交流电的复平面表示

为什么用复数表示

对正弦波这样的三角函数进行数学处理，用复数是很合适的。如图 1.62 所示，如果在复平面上表示正弦波的相量图，则 $\sqrt{2}\sin(\omega t+\varphi)$ 所表示的正弦交流电可在直角坐标系中

写成

$$a=a+jb$$

利用线段 $Oa=I$ 以及 X 轴(实轴)和 Oa 的夹角 φ，坐标上的点 a 可表示为

$$a=I\cos\varphi+jI\sin\varphi=I(\cos\varphi+j\sin\varphi) \tag{1.58}$$

如将欧拉公式 $e^{j\varphi}=\cos\varphi+j\sin\varphi$ 代入式(1.58)则有

$$a=Ie^{j\varphi} \tag{1.59}$$

该式为极坐标形式。复数的积和商可以采用指数法则进行计算，十分方便。式中，j 使坐标图上的相量旋转 90°，适用于表示相位的变化。

相关知识

◆ 欧拉公式的数学背景

对指数函数 e^x 展开，即可得到

$$e^x=1+\frac{x}{1!}+\frac{x^2}{2!}+\cdots+\frac{x^n}{n!}+\cdots$$

令式中 $x=j\psi$，则

$$e^{j\psi}=1+(j\psi)+\frac{(j\psi)^2}{2!}+\cdots+\frac{(j\psi)^n}{n!}+\cdots$$

另外，如果展开 $\cos\psi$、$\sin\psi$，则得到如下的幂级数

$$\cos\psi=1-\frac{\psi^2}{2!}+\frac{\psi^4}{4!}-\cdots,\quad \sin\psi=\psi-\frac{\psi^3}{3!}+\frac{\psi^5}{5!}-\cdots$$

因 $j^2=-1$，所以

$$\begin{aligned}e^{j\psi}&=\left(1-\frac{\psi^2}{2!}+\frac{\psi^4}{4!}-\cdots\right)+j\left(\psi-\frac{\psi^3}{3!}+\frac{\psi^5}{5!}-\cdots\right)\\&=\cos\psi+j\sin\psi\end{aligned}$$

16　交流电路的 R、L、C

要　点

在交流电路中，对电路产生影响的主要元件为电阻 R、电感 L 和电容 C。L 和 C 有改变交流电相位的作用。与直流电时的情况一样，这些元件的电流和电压的关系也符合欧姆定律。

解　释

大小和相位

电阻 R 起着阻碍交流电流流动的作用。其电阻的大小即为电阻值本身。如图 1.63 所示，电流与电压之间不产生相位差。

$$R=R\ (\Omega) \tag{1.60}$$

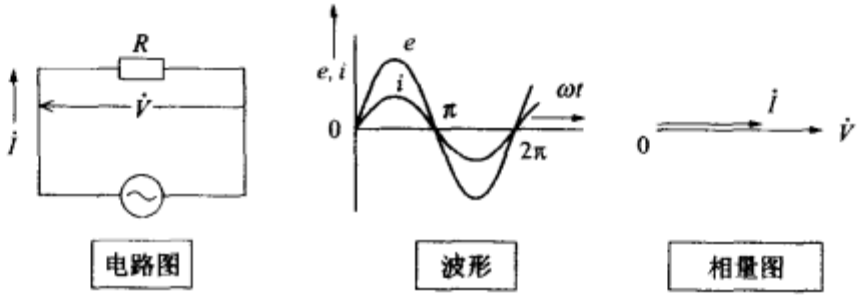


图 1.63　交流电路的 R

感抗

电感也阻碍交流电流的流动，其作用称为**感抗** X_L，与电感的大小 L(H)和频率 f(Hz)成正比，设角频率 $\omega=2\pi f$，则有

$$X_L=\omega L=2\pi fL\ (\Omega) \tag{1.61}$$

如本章第 6 节所述，由于线圈产生的感应电动势会阻碍电流的变化，所以电压的上升不能使电流立刻增加，反之，电压的下降也不能使电流立刻减少。所以电流的相位比电压的相位滞后 $\pi/2$(rad)(90°)，如图 1.64 所示。

容抗

电容也会阻碍电流变化，其作用称为**容抗** X_C，容抗的大小与电容 C 的大小和频率 f(Hz)成反比：

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{2\pi fC}\ (\Omega) \tag{1.62}$$

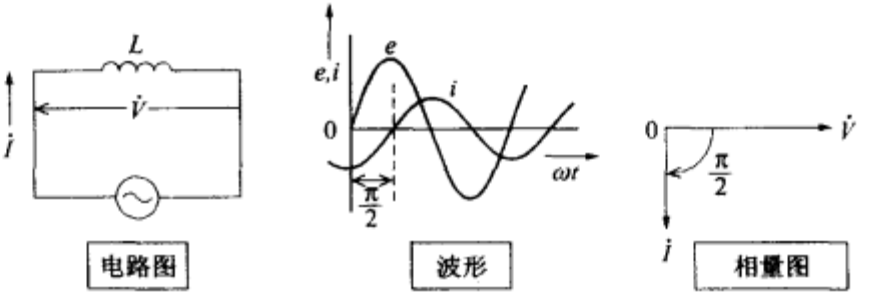


图 1.64　交流电路的 L

电容器在电压升高时积蓄电荷，电压降低时释放电荷。由于电流是这种电荷运动产生的，所以电流的相位超前于电压 $\pi/2$(rad)(90°)，如图 1.65 所示。

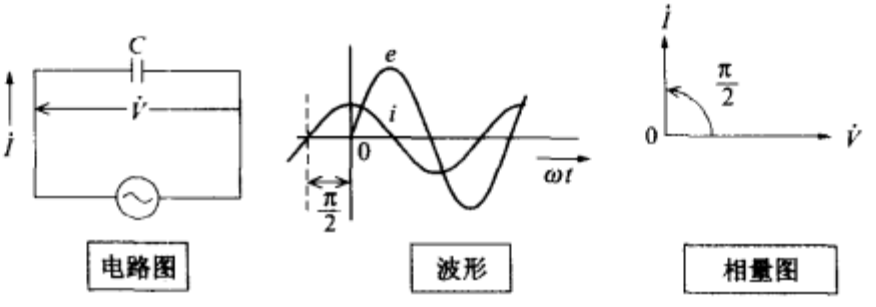


图 1.65　交流电路的 C

复数表示法

阻抗

在交流电路中，阻碍电流流动的参数称为**阻抗** Z。如以电压为基准，用复数表示电路中各元件的阻抗，可分别表示如下。

由于电阻不会使相位发生改变，所以在复平面上也没有变化，故有

$$Z=R \tag{1.63}$$

因为电感 L 使电流的相位滞后 $\pi/2$(rad)，所以

$$Z=jX_{\mathrm{L}}=j\omega L \tag{1.64}$$

由于电容 C 使电流的相位超前 $\pi/2$(rad)，所以

$$Z=-jX_{\mathrm{C}}=\frac{1}{j\omega C} \tag{1.65}$$

交流电路的欧姆定律

交流电路的电压 $\dot{V}$ 与阻抗 Z、电流 $\dot{I}$ 的关系符合欧姆

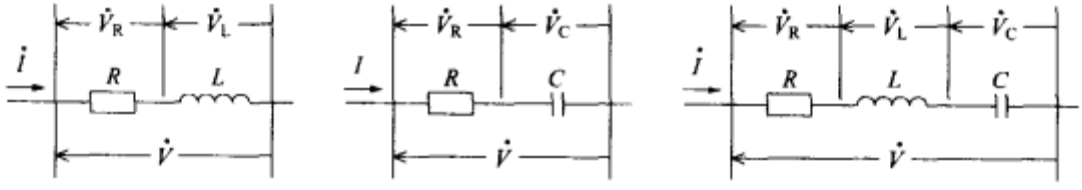
定律：

$$\dot{V}=Z\dot{I} \tag{1.66}$$

同样，电压 $\dot{V}$、电流 $\dot{I}$ 和感抗 X_L 及容抗 X_C 之间欧姆定律也成立：

$$\dot{V}=X_L\cdot\dot{I},\quad \dot{V}=X_C\cdot\dot{I} \tag{1.67}$$

交流电路中各元件串联时，由于流过各元件的电流相同，则电路的阻抗 Z、电压 $\dot{V}$、相位 φ 的关系可用图 1.66 表示。



(a) $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$，$V=ZI$，$\varphi=\arctan\dfrac{X_L}{R}$

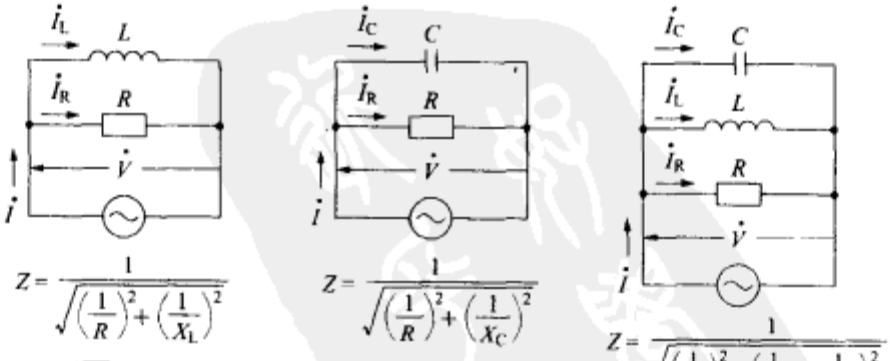
(b) $Z=\sqrt{R^2+X_C^2}$，$V=ZI$，$\varphi=\arctan\dfrac{X_C}{R}$

(c) $Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}$，$V=ZI$，$\varphi=\arctan\dfrac{X_L-X_C}{R}$

(a) *RL* 串联　(b) *RC* 串联　(c) *RLC* 串联

图 1.66　交流串联电路

交流电路中各元件并联时，由于加在各个元件的电压相同，故电路的阻抗 Z、电流 $\dot{I}$、相位 φ 的关系可用图 1.67 表示。



(a) $Z=\dfrac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_L}\right)^2}}$，$I=\sqrt{I_R^2+I_L^2}$，$\varphi=\arctan\dfrac{R}{X_L}$

(b) $Z=\dfrac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_C}\right)^2}}$，$I=\sqrt{I_R^2+I_C^2}$，$\varphi=-\arctan\dfrac{R}{X_C}$

(c) $Z=\dfrac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2+\left(\frac{1}{X_L}-\frac{1}{X_C}\right)^2}}$，$I=\sqrt{I_R^2+(I_L-I_C)^2}$，$\varphi=\arctan\left(\dfrac{I}{X_L}-\dfrac{I}{X_C}\right)R$

(a) *RL* 并联　(b) *RC* 并联　(c) *RLC* 并联

图 1.67　交流并联电路

相关知识

◆ 阻抗和导纳

设式(1.66)中阻抗 Z 的倒数为 Y，则

$$\dot{I}=Y\dot{V} \tag{1.68}$$

式(1.68)中的 Y 称为导纳，单位为西[门子](S)。阻抗 Z 的大小表示电流难以通过的程度，而导纳 Y 则表示电流容易通过的程度。

如用电阻 R 和电抗 X 以复数法表示 Z，则

$$Z=R+jX \tag{1.69}$$

用复数表示 Y，可表示为

$$Y=G+jB \tag{1.70}$$

这里实部 G 称为电导，虚部 B 称为电纳。

例 题

在电阻与电抗串联的电路中，如加 50V 直流电压，则有 12.5A 的电流通过，如加 100V 交流电压，则电流为 20A。求电路的感抗为多少？

答　电路的电阻为

$$R=\frac{V}{I}=\frac{50}{12.5}=4(\Omega)$$

从　$I=\dfrac{V}{|Z|}$ 可得 $20=\dfrac{100}{|Z|}$，所以 $|Z|=5\Omega$

因　$|Z|=\sqrt{R^2+X_L{}^2}$，　$5=\sqrt{4^2+X_L{}^2}$　所以 $X_L=3\Omega$

应用知识

简单滤波电路

从既含有交流分量又含有直流分量的信号中仅选取出直流分量，或仅选取出某个频率的信号，这种电路称为滤波电路。图 1.68 所示为其中一例。利用 L 和 C 的作用滤除交流分量，R 上是已除去大部分交流分量的直流电压。

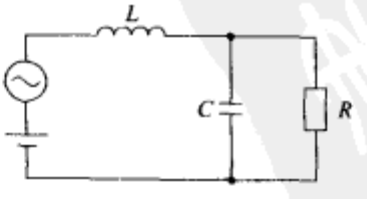


图 1.68　简单滤波电路

17 谐振电路

要 点

在有电感 L 和电容 C 两种元件的电路中，随 L 和 C 值的变化会产生某种电振荡。当振荡频率等于电源的频率时，会产生电路谐振。

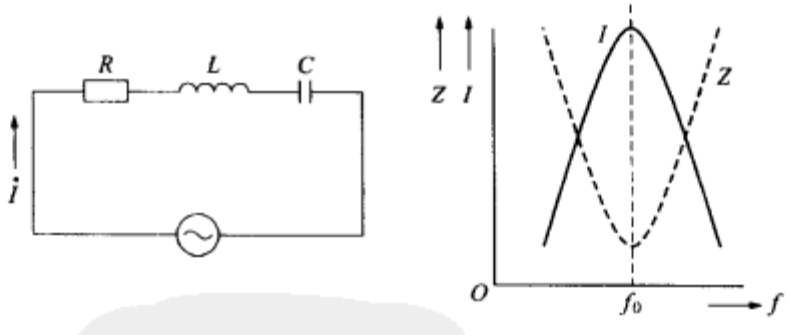
解 释

串联谐振电路

图 1.69(a)的 RLC 串联电路中，当 $X_L = X_C$ 时，电路发生谐振，L 和 C 的作用相互抵消。于是，如图 1.69(b)所示，电路阻抗 $Z=R$，电流 $\dot{I}$ 达到最大值。此时电源的频率称为**谐振频率**，可用式(1.71)表示，即

谐振频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\ (\text{Hz}) \tag{1.71}$$



(a) 电路　　(b) 频率特性

图 1.69 串联谐振电路

这里，通常把谐振时 L 或 C 上的电压与电源电压之比称为 Q 值，Q 值可用式(1.72)表示，即

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{1.72}$$

Q 值越大，图 1.69(b)的谐振曲线就越尖锐，电路的频率选择性也就越好。这就是说，谐振电路的 Q 值可表示电路的品质。

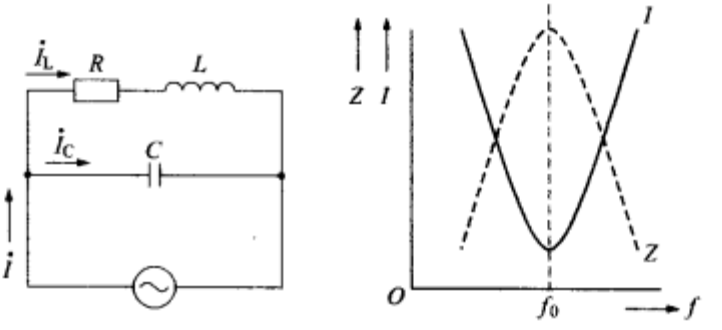
并联谐振电路

在图 1.70(a)所示的 LC 并联电路中，当 $X_L = X_C$ 时，电

路谐振，I_C 和 I_L 相互抵消。于是电路的阻抗达到最大值，电流 I 为最小，如图 1.70(b)所示。此时电源的频率称为谐振频率 f_0，其大小可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \text{ (Hz)} \tag{1.73}$$

式(1.73)中，R 远小于 X_L 时，式(1.73)就与式(1.71)相同。



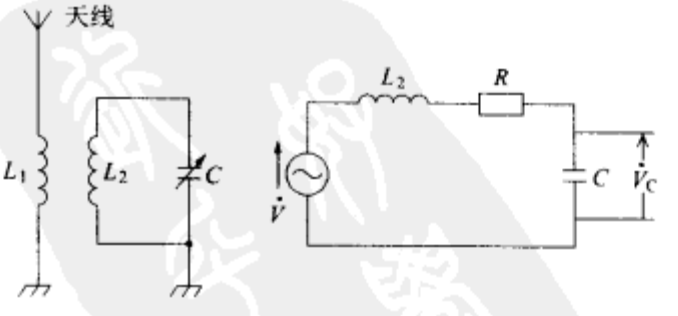
(a) 电路　　(b) 频率特性

图 1.70　并联谐振电路

应用知识

调谐电路

图 1.71(a)所示的收音机调谐电路与图 1.71(b)所示的 RLC 串联电路等效。改变 C 可使电路与接收频率谐振。于是 $\dot{V}_C$ 增大，找到接收信号。



(a) 电路　　(b) 等效电路

图 1.71　调谐电路

18 基尔霍夫定律

要 点

基尔霍夫定律是关于电路节点与回路的定律，在求解复杂电路的电流时经常使用。基尔霍夫定律分为基尔霍夫电流定律（第一定律）和基尔霍夫电压定律（第二定律）。

解 释

基尔霍夫电流定律（第一定律）

该定律为“流入任意节点的电流之和必等于流出该节点的电流之和”。在图 1.72 所示的电路中来看节点 a，从设定的电流方向可以得到式(1.74)，即

$$\underset{\text{（流入的电流）}}{I_1 + I_2} = \underset{\text{（流出的电流）}}{I_3} \tag{1.74}$$

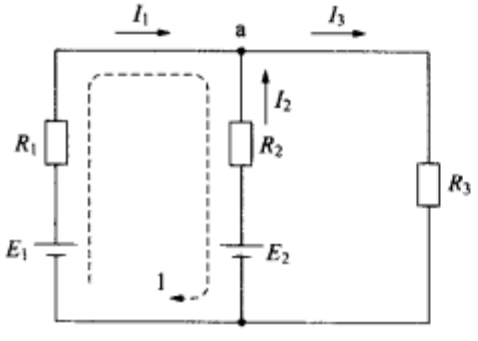


图 1.72 节点与回路

基尔霍夫电压定律（第二定律）

该定律为“任一闭合回路内的电动势之和等于电压降之和”。现在来看图 1.72 所示的回路 1，沿闭合回路的方向和假定的电流方向，可得式(1.75)，即

$$\underset{\text{（电动势之和）}}{E_1 - E_2} = \underset{\text{（电压降之和）}}{R_1 I_1 - R_2 I_2} \tag{1.75}$$

基尔霍夫定律的使用方法

基尔霍夫定律的使用方法是

① 设定各支路的电流方向。

② 利用基尔霍夫第一定律对节点列方程。

③ 所有支路必须至少利用一次来选择闭合回路。利用

基尔霍夫第二定律对各回路列方程。

④ 解①、②项所建立的方程，求出各支路电流。

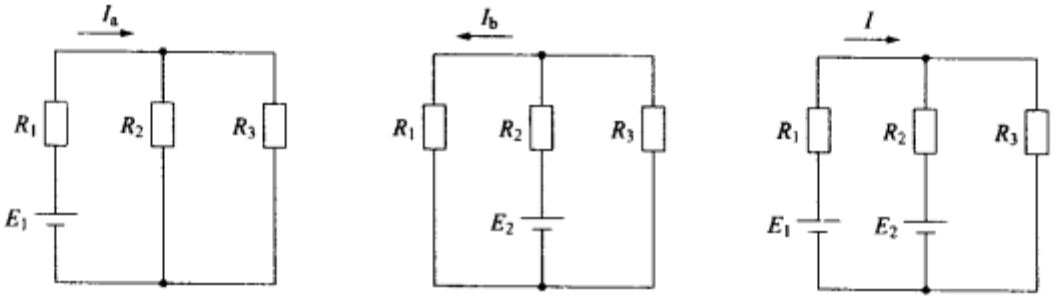
⑤ 如果求得的电流为负值，则说明实际的电流方向与设定的电流方向相反。

相关知识

◆ 叠加原理

利用基尔霍夫定律的计算过程中，必须解联立方程，往往使计算变得复杂，如果利用叠加原理进行计算就会变得很方便，即“在包含多个电动势的网络中，各支路电流等于各电动势单独作用所产生的电流之和”。

图 1.72 的电路可分成包含各不同电动势的电路，如图1.73(a)和图 1.73(b)所示，分别求出各个电路的电流。然后再如图1.73(c)所示求各个电路电流的代数和。



合成电阻

$$R_a = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

$$I_a = \frac{E_1}{R_a}$$

(a)

合成电阻

$$R_b = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

$$I_b = \frac{E_2}{R_b} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

(b)

$$I = I_a - I_b$$

(c)

图 1.73　叠加原理

例 题

图 1.72 中设 $E_1 = 4\text{V}$，$E_2 = 2\text{V}$，$R_1 = 0.25\Omega$，$R_2 = 0.1\Omega$，$R_3 = 0.1\Omega$，求 I_1、I_2、I_3 各为多少？

答　从式(1.74)可得，$I_1 + I_2 = I_3$

从式(1.75)可得，$4 = 0.25I_1 + 0.1I_3$，$2 = 0.1I_2 + 0.1I_3$

解方程，得：$I_1 = 10\text{A}$，　$I_2 = 5\text{A}$，　$I_3 = 15\text{A}$

19 戴维南定理

要 点

在含有多个电源和阻抗的网络中，为求出某特定支路流过的电流，可以应用戴维南定理。设支路断开时端子之间的电压为 V_0，输入端阻抗为 Z_0，则流过支路阻抗 Z_1 的电流为

$$I=\frac{V_0}{Z_0+Z_1}$$

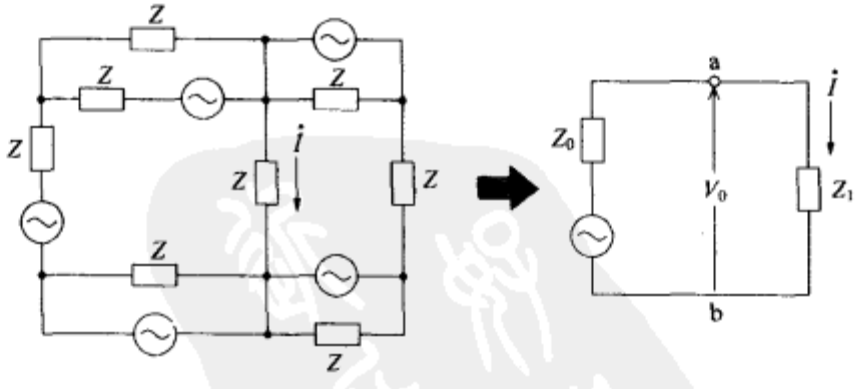
解 释

无源电路

有源器件
无源器件
无源电路

电路按其性质有各种分类方法，如果着眼于电路的构成，三极管、二极管之类的元件只要供给电源就能起到放大和整流作用，这种元件称为**有源器件**。而电阻、电感、电容等只能消耗或储存外部所提供的能量，这种元件称为**无源器件**。而把由无源器件和电源所构成的电路称为**无源电路**。

在无源电路中，欲求图 1.74(a)所示网络中的某支路电流时，可以先转换成图 1.74(b)所示的简化电路再来求解。



(a) 复杂电路　　(b) 简化电路

图 1.74　无源电路

输入和输出端阻抗

图 1.75 中，为了用戴维南定理求输入端的电流 $\dot{I}_1$，可以去掉信号源断开 a、b，再求由此端计算得出的电路的阻抗。这个阻抗称为输入阻抗。

如要求图 1.75 所示输出端的电流 $\dot{I}_2$，可以去掉负载，从 c、d 断开，求出从 c、d 计算得出的电路的电阻。该阻抗称为输出阻抗。

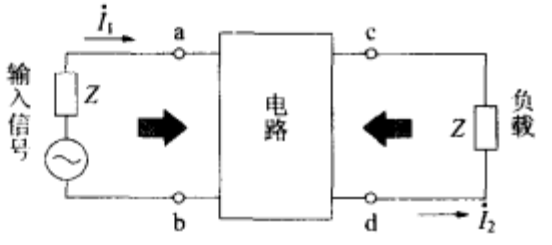


图 1.75　输入、输出阻抗

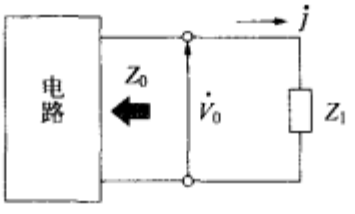


图 1.76　戴维南定理

戴维南定理

在图 1.76 所示的电路中，设端子之间的电压为 $\dot{V}_0$，从此处看到的电路阻抗为 Z_0，流过阻抗 Z_1 支路的电流 $\dot{I}$ 可用下式表示：

$$\dot{I}=\frac{\dot{V}_0}{Z_0+Z_1}$$

戴维南定理

这个关系是由戴维南发现的，被命名为**戴维南定理**。

戴维南定理的用法

例如，为求得流过如图 1.77(a)所示电路中 Z_1 的电流，

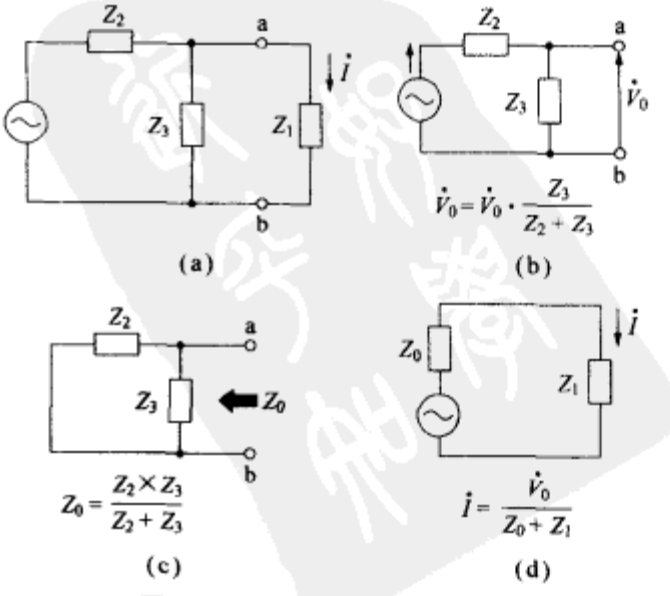


图 1.77　戴维南定理的用法

可以将它转换成图 1.77(d)所示的电路。

(1) 求开路电压：先断开 Z_1，a、b 开路时的开路电压 $\dot{V}_0$ 如图 1.77(b)所示。

(2) 求内部阻抗：断开 Z_1，将电路的电源短路，从 a、b 看到的内部阻抗 Z_0 示于图 1.77(c)中。

(3) 根据戴维南定理求电流 $\dot{I}$。

例 题

求如图 1.78 所示电路中的电流 $\dot{I}$ 为多少？

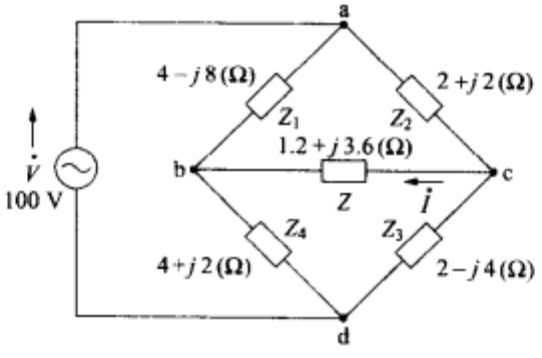


图 1.78 例题

答 首先去掉 Z，b、c 间的开路电压 $\dot{V}_{bc}$ 为

$$\dot{V}_{bc}=\dot{V}\left(\frac{Z_4}{Z_1+Z_4}-\frac{Z_3}{Z_2+Z_3}\right)$$
$$=60-j100\ (\mathrm{V})$$

其次在断开的 b、c 间看到的阻抗 Z_0 为

$$Z_0=\frac{Z_1Z_4}{Z_1+Z_4}+\frac{Z_2Z_3}{Z_2+Z_3}$$
$$=6.8+j0.4\ (\Omega)$$

所以，根据戴维南定理可得到

$$\dot{I}=\frac{\dot{V}_{bc}}{Z_0+Z}=\frac{60-j100}{(6.8+j0.4)+(1.2+j3.6)}$$
$$=1-j13\ (\mathrm{A})$$

20　电路的分布参数 R、L、C

要　点

在处理远距离输电和高频信号的电路中，不能将电阻 R、电感 L 和电容 C 等元件作为集中参数，而必须将其看作分布在整条线路上的参数来处理。

解　释

电路元件值的大小与波长

在远距离输电线路中，导线的电阻与整条线路有关，并且导线之间的互感、导线与大地之间的电容都是不可忽视的，所以，电路中的电阻、电感、电容等参数不是仅集中在电路的元件上，而必须视为分布在整条线路上的分布参数来处理(见图 1.79)。这种电路称为**分布参数电路**。

分布参数电路

另外，在高频通信线路中，尽管传输路径很短，但当信号频率非常高时，与波长相比电路元件的大小也就不可忽视了。在这种情况下，各个参数也必须作为电路的分布参数来处理。在通信线路类电路中，电感和电容将成为电路特性的决定性因素。包含这些参数总体性质的参数称为**特征阻抗** Z_0，设无电阻分量，则特征阻抗为

特征阻抗

$$Z_0=\sqrt{\frac{L}{C}}\ (\Omega) \tag{1.76}$$

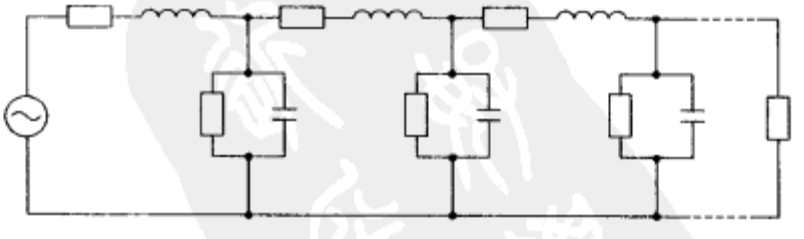


图 1.79　分布参数电路

等效电路

在用计算方法求分布参数电路的电气特征时，由于电气参数是作为整个电路的分布参数处理的，所以它应该是位置的函数。在可视为均匀分布参数的情况下，可以用图 1.80 所示的简单电路来处理。

等效电路

为方便处理而使用的与实际电路具有相同作用的替换电路称为**等效电路**。例如，图 1.80 是图 1.79 的等效电路。

另外，如果电源的阻抗与负载端的阻抗不同时，从本章第 2 节可知，这将不能获得最大的输出功率。在通信线路中也是一样，由于这时会出现信号的反射和衰减，所以必须加上适当的特征阻抗，使两边的阻抗相一致，此称为**阻抗匹配**。

阻抗匹配

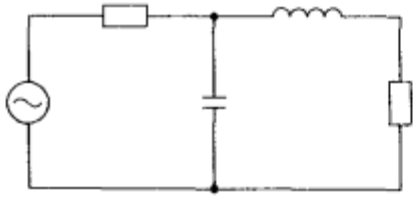


图 1.80 等效电路

应用知识

电视馈线

电视载波的高频信号在线路中传输时损失很大。所以，天线与接收机相连的馈线必须是与信号波长相适应的低损耗馈线。

电视馈线可以使用图 1.81(a)所示的对称电缆和图 1.81(b)所示的同轴电缆。特别是同轴电缆，它是用内、外导体所围成的空间传输电磁波，因而损耗少、频带宽。

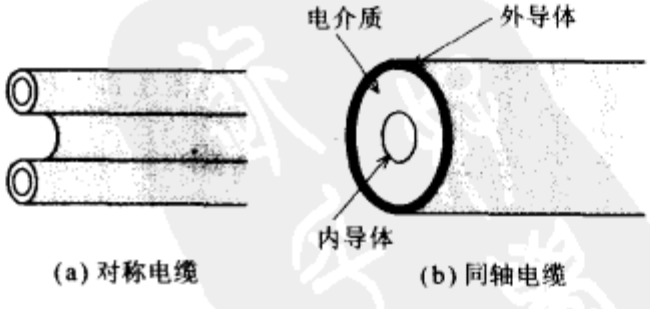


图 1.81 电视馈线

21　过渡现象

要　点

电路从一种稳定状态过渡到另一种稳定状态所经历的过程称为过渡现象。利用过渡现象可以产生脉冲波或产生振荡。由于过渡现象是随时间变化的，所以要用微分方程进行求解。

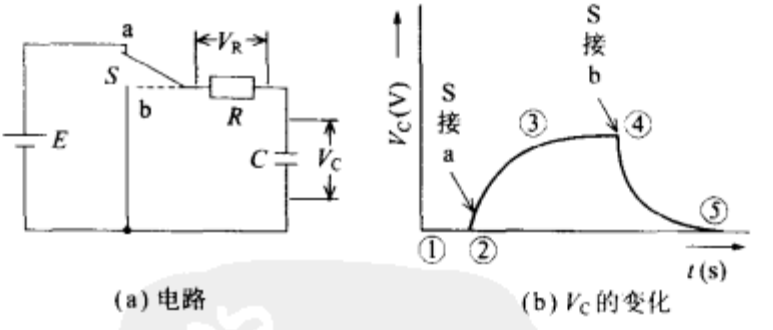
解　释

过渡过程和稳态

图 1.82(a)所示的电路中，如将开关 S 接到 a，则电源对电容器 C 进行充电。然后将开关 S 接到 b，电容器 C 就放电。电容器 C 端电压 V_C 的变化曲线如图 1.82(b)所示。

图 1.82(b)中，②～③为充电，④～⑤为放电。这种变化过程称为**过渡现象**。而①～②和③～④之间没有变化的状态称为**稳态**。

过渡现象
稳态



(a) 电路　　(b) V_C 的变化

图 1.82　RC 串联电路

RC 串联电路

在图 1.82(a)所示的 RC 串联电路中，用开关 S 控制电容器 C 的充、放电，C 的端电压 V_C 和 R 的端电压 V_R 变化曲线如图 1.83 所示。

在这种情况下，如果固定 C，改变 R 值，当 R 值增大时，C 的端电压变化速度减慢；而 R 减小，则变化速度加快。另外，假如 R 值固定，改变 C 值的大小，则 C 值大时，C 的端电压变化减慢。C 值小则变化速度加快。

也就是说，电容器 C 充、放电电压变化的速度取决于 C

和 R 值的大小，其关系可表示为

$$T=RC\ (\mathrm{s}) \tag{1.77}$$

时间常数

式(1.77)中的 T 称为**时间常数**，它表示过渡现象的变化速度。时间常数 T 的数值为到达稳定状态所需时间的63.2%。

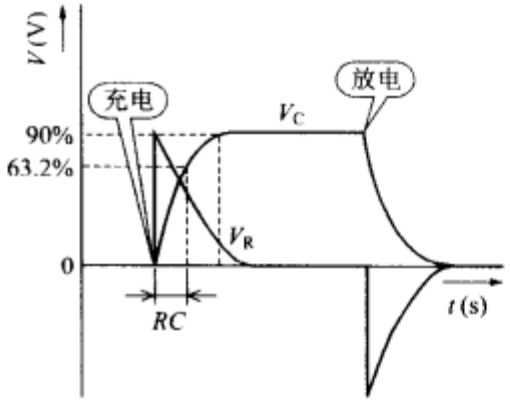


图 1.83 RC 串联电路元件端电压

RL 串联电路

在图 1.84(a)所示的 RL 串联电路中，开、合开关 S 时，L 的端电压 V_L 以及 R 的端电压 V_R 的变化示于图 1.84(b)中。RL 串联电路的时间常数可表示为

$$T=\frac{L}{R}\ (\mathrm{s}) \tag{1.78}$$

用微分方程表示 *RL* 串联电路

在过渡现象中，电路的输入信号是电源的断开与闭合，它不具有正弦波的规律。因而描述产生过渡现象的电路需要采用以时间为独立变量的微分方程。

例如，在图 1.84(a)所示的 RL 串联电路中

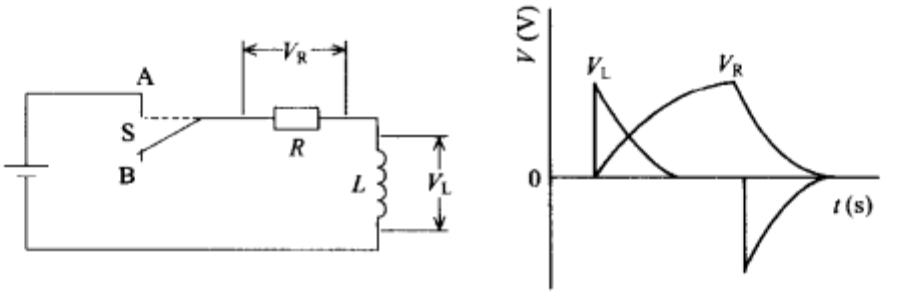
$$V_R+V_L=V \tag{1.79}$$

将 S 接至 A 点时，电流 $i(t)$ 的微分方程为

$$L\frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t}+Ri(t)=V \tag{1.80}$$

由于 $t<0$ 时 $i=0$，所以 $i(t)$ 为

$$i(t)=\frac{V}{R}(1-\mathrm{e}^{-\frac{R}{L}t}) \tag{1.81}$$



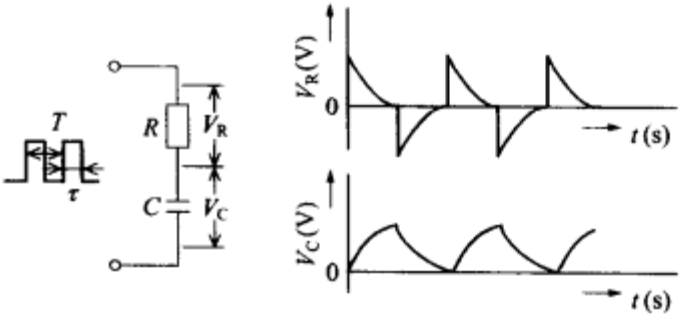
(a) 电路　　(b) 电路的端电压

图 1.84　*RL* 串联电路

应用知识

微分电路与积分电路

在图 1.85(a)所示的 *RC* 串联电路中，当输入脉冲宽度为 τ(s)、周期为 T(s)的方波时，V_R、V_C 的波形示于图 1.85(b)中。

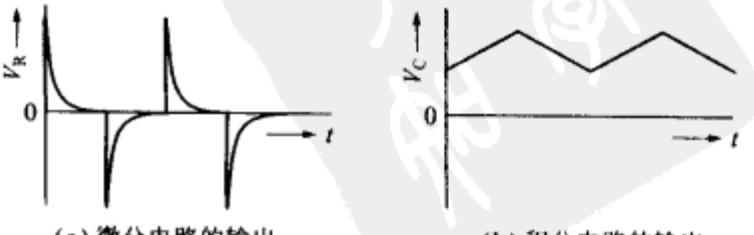


(a) 电路　　(b) 输入方波时的输出电压

图 1.85　*RC* 串联电路

在这个电路中，当时间常数 *RC* 远小于脉冲宽度 τ 时，则 V_R 表示输入脉冲的变化率，如图 1.86(a)所示。而当 *RC* 远大于 τ 时，V_C 即表示输入脉冲变化量的积分值，如图 1.86(b)所示。前者称为**微分电路**，后者称为**积分电路**，详细内容将在第 4 章说明。

微分电路
积分电路



(a) 微分电路的输出　　(b) 积分电路的输出

图 1.86　应用举例

这样就可以利用过渡现象进行脉冲波形的变换，或从脉冲波形中取得所需要的信息。

题外话

地磁与生物磁

不仅是永久磁铁或电流可以产生磁通量，人类生存的地球也是一个大磁体。地球表面的磁通量称为地磁。通过指南针可以知道，地球的北极是磁通量的N极，南极是S极；还可以知道，磁极与地球地理极点稍有偏离。另外，受太阳活动的影响，地磁是变化的。如果变化很大，就形成“磁暴”现象，它会影响利用电离层的通信工作。

人类在日常生活中对地磁没有感觉，假如人体也是一个磁性体，那将会怎么样？如果人本来具有面向北方的性质，那么为了转向南方，就必须付出气力以克服磁通量的作用。不过，自然界确实存在着体内具有磁性的生物。例如，有一种称为趋磁菌的细菌，它的体内便具有带磁性的超微粒子，该细菌可用来感知地磁，因而它能转向泥多的地下。

现在已查明，有多种生物，它们是体内具有这种磁性微粒的生物磁体。鲑鱼能返回它们的出生河流，蜜蜂能准确地返回蜂巢，这不正是因为它们体内的磁体能感知地磁吗？

很遗憾，人的体内不能产生这种磁性体。假如可以人工制造的话，那将有很大的前途。例如，将磁体与人的微观组织相结合，那么也许就可以很容易地利用磁性从人体外控制体内的重要组织(见图1.87)。



图1.87 地磁与生物磁

第 2 章

电子物性和电子元器件

● 责任编委
山本义男
● 执　　笔
山本义男

物质所具有的电气性质称为电子物性。物质是怎样成为导体和绝缘体的？物质当中也有既不是导体又不是绝缘体，而是处在它们中间状态的半导体。

半导体，不仅它的电阻处在导体和绝缘体之间，而且它在电气方面也具有独特的性质。物质具有不同的电气性质是因为物质中的电子的运动不同所致。为了了解二极管和晶体管等元器件的作用，在了解物质结构的同时，还必须先看看物质中电子的运动状态。

本章在学习半导体元件的物理基础的同时，也希望了解它的结构、功能及工作原理。

1　原子与电子

要　点

构成物质的原子，它是由原子核和电子组成。如果是孤立的原子，它的电子只能在限定的电子轨道上稳定地运动。轨道最外层的电子给出了原子的化学键。

解　释

关于原子模型

地球和火星等行星是围绕着太阳做轨道运动。原子核和电子的关系也和太阳与行星的关系相似。但是，原子核和电子是带电的，所以如果电子和行星做同样的运动，那么就会失去能量而完全毁掉。原因是荷电粒子做圆周那样的加速运动时，它就以电磁波的形式放出能量。电子绕核运动时以电磁波形式放出能量和天线流过高频电流时发射电波的原理相同。但是在研究电子物性时，因为在这些方面没有太大差异，所以常采用模型来进行研究。这种简单的原子模型被称为**长冈-卢瑟福原子模型**（见图 2.1）。

长冈-卢瑟福原子模型

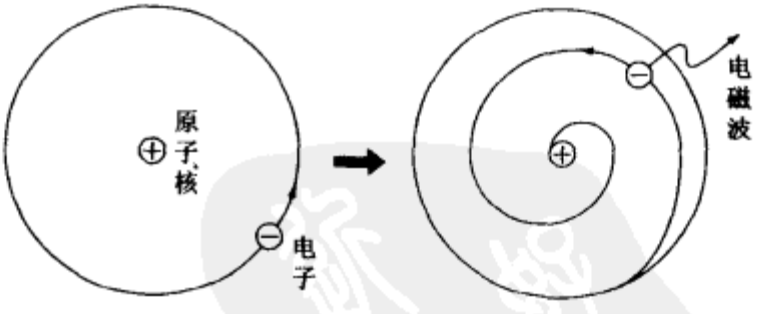


图 2.1　长冈-卢瑟福原子模型

实际上，电子具有波动性，它在原子中处在一种共振状态。在肉眼看不到的极小的原子世界里，粒子具有波动性质，而波动又具有粒子的性质。

氢原子的能级

如果电子具有波动的性质，那么氢原子为何能稳定地存在呢？如果是波，那它的波长又是怎样的？根据德布罗意原理，如果电子的质量为 m，速度为 v，那么它的波长为

$$\lambda = h/mv \quad (h:\text{普朗克常数}) \tag{2.1}$$

德布罗意波 **物质波** **电子波**

把这个波称为**德布罗意波**。德布罗意波对于所有物质粒子都成立，称为**物质波**。在电子的情况下称**电子波**。电子波在原子中处于一种共振状态(见图 2.2)。



图 2.2 玻尔原子模型

以孤立的氢原子为例来研究一下电子的运动。在共振状态(正常状态)下，电子轨道的长度，正好等于电子波波长的整数倍，故有

$$2\pi r = n\lambda \ (n=1,2,3,\cdots) \tag{2.2}$$

玻尔量子条件

把此称为**玻尔量子条件**。另外，为了使电子能以粒子形式做圆周运动，这时，因为库仑力和离心力正好相平衡，故可得

$$\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \frac{mv^2}{r} \tag{2.3}$$

由式(2.1)、式(2.2)、式(2.3)可求得

$$r = \frac{\varepsilon_0 h^2}{\pi m e^2} n^2$$

$$= 0.53n^2(\text{Å}) \quad (\text{Å} = 10^{-10}\text{m}) \tag{2.4}$$

因为 n 是整数，所以从式(2.4)可知：电子轨道是离散的，而且电子还不能随意占有一个轨道。$n=1$ 的特殊情况下，这时的 r 称为**玻尔半径**，且以此为原子大小的指标。

玻尔半径

因为电子具有的总能量 E 是它的动能和位能之和，故有

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r}\right)$$

$$= -\frac{me^4}{8\varepsilon_0{}^2 h^2 n^2} \tag{2.5}$$

因为 n 是整数，所以电子具有的能量 E 也是一个一个

能级

的离散值。把与整数 n 相对应的 E 称为**能级**。图 2.3 中给出了电子轨道和能量关系的模式。

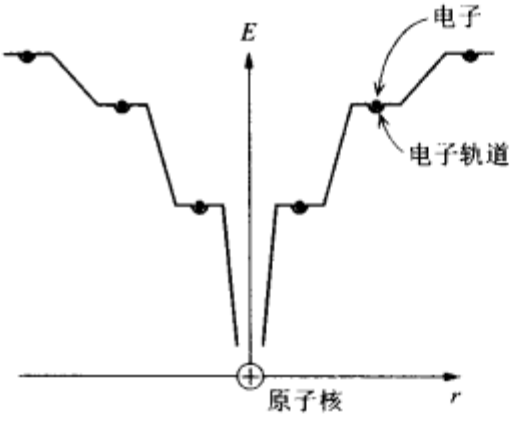


图 2.3　电子轨道的模式

硅原子的电子配置

硅

硅是最常用的半导体。而且它大量存在于构成地壳的岩石中。它和孤立的氢原子情况一样，孤立的硅原子的电子轨道和电子能量是离散的，电子轨道从内层开始按顺序称为 K 层、L 层和 M 层。能处在各轨道的电子数是有上限的。K 层是 2 个，L 层是 8 个，M 层也仅能容纳到 8 个。可是，因为硅的质子数是 14 个，所以 M 层上的电子只有 4 个，没有收容满。最外面的轨道称为**最外层轨道**。最外层的电子称为**价电子**。价电子给出该原子的化学键（见图 2.4）。

最外层轨道

价电子

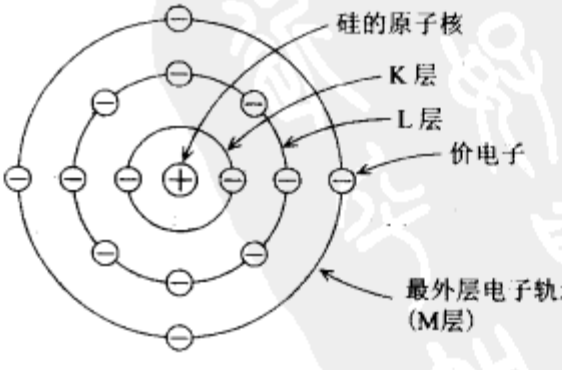


图 2.4　硅原子的电子配置

2　原子的排列和晶体

要　点

原子有序而规则排列的物质称为晶体。如经常使用的半导体硅和锗，即是依靠共价键而形成金刚石样结构的晶体。任意一种原子，假如它属于金刚石结构，那么4个价电子就可和4个原子形成共价键结合。

解　释

球的堆积

看过雪的结晶吗？它是什么样的？如果仔细地看，就会看到，它的形状很规则且很漂亮。形状虽然各种各样，但都呈规则的点对称。这种规则性来自水分子的性质。水分子的性质是由构成水分子的原子的性质而来的。把原子和分子非常规则地排列起来的物质称为**晶体**。把排列很规则的单元称为**晶格**。把规则性混乱了的地方称为**晶格缺陷**。

晶体
晶格　晶格缺陷

作为半导体而使用的硅也可形成晶体。形成晶体的原子和分子是怎样排列的？首先假定忽视原子的性质，来看一下半径相同的硬球的排列方式。如果是无间隙很规则排列硬球的方法，那它只有一种（见图2.5）。当堆成两层时，排列情形仍然只有一种，即无论是把硬球放在B处也好，放在C处也好，转180°其结构是一样的。可是把球堆成三维时，就有两种方式。即把硬球放在A处或C处，其三维结构是不同的。放在A处时，称为**面心立方晶格**，金属原子多是这种排列方式。放在C处时，称**最密堆积六方晶格**，这是冰的水分子排列方式。

面心立方晶格
最密堆积六方晶格

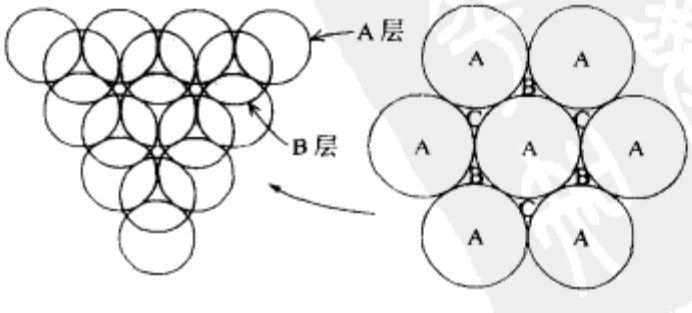


图2.5　硬球的最密堆积

关于金刚石结构

金刚石结构

半导体硅是做成**金刚石结构**。金刚石结构可以按二个面心立方晶格为基础来进行考虑。面心立方晶格是与立方体的 8 个顶点和 6 个面的中心处分别配置原子的结构相同。假如把这二个面心立方晶格分别在 x 轴、y 轴和 z 轴方向每隔 1/4 错开重复排列起来，那就成为金刚石结构。于是不管哪一个原子都分别和相邻的其他 4 个原子形成共价键的结构。再来看看，一个面心立方晶格中增加的硅原子（图中黑圆点）的坐标（假定每边长度为 a）。坐标轴如图中所示那样选取时，则分别为（见图 2.6）

$(0.25a,0.25a,0.25a)$，　$(0.75a,0.75a,0.25a)$，

$(0.75a,0.25a,0.75a)$，　$(0.25a,0.75a,0.75a)$.

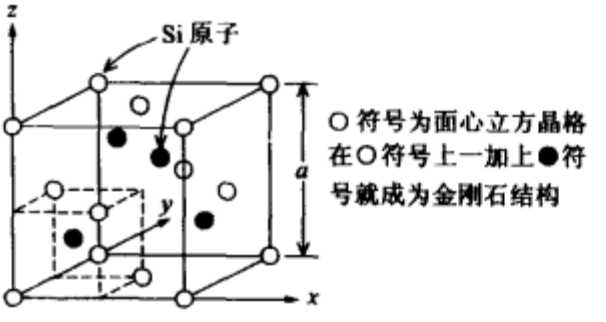


图 2.6　金刚石结构

关于硅晶体的平面模型

如果将立体的结晶表示在平面上，则其结构很难看懂。在半导体中不只是结晶的问题，就是像形成金刚石结构的 4 个价电子的作用也是非常重要的（见图 2.7）。因此，常常使用着眼于价电子的平面模型来说明问题。它是用围起价电子的二条线来描绘共价键状态的（见图 2.8）。

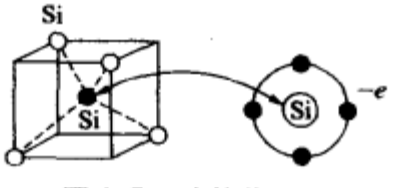


图 2.7　硅的价电子



图 2.8　金刚石结构的平面模型

3 能级和能带

要点

假如是孤立的原子，它的电子轨道是一层一层不相连的。如果成为晶体，电子轨道就变宽而成为一个带子。电子轨道密集的宽带就形成了一层一层的允带。

解释

电子轨道分裂的背景(原因)

原子中的电子具有确定的轨道和确定的能量。那么，两个相同元素的原子相接近时将是怎样的？两个原子形成的势能(potential)是两个单独原子时的势能相互重叠。这时它与单独原子相比，其势能降低了。如图 2.9 所示，相同电子轨道的能级发生了相互重叠。可是，实际上一个能级上只能容纳不超过 2 个电子。这一现象称为**泡利(Pauli)不相容原理**。因此，轨道分裂成两条(见图 2.10)。相邻轨道间的能量差很小时，电子则很容易改变轨道。如果有三个电子集聚，其重叠的能级轨道就分裂成三条。

泡利不相容原理

单独原子时，电子得到的能量是离散值。如果是晶体，因为原子有无数个，所以，分散值就汇集成带状的**能带**(energy band)。

能带

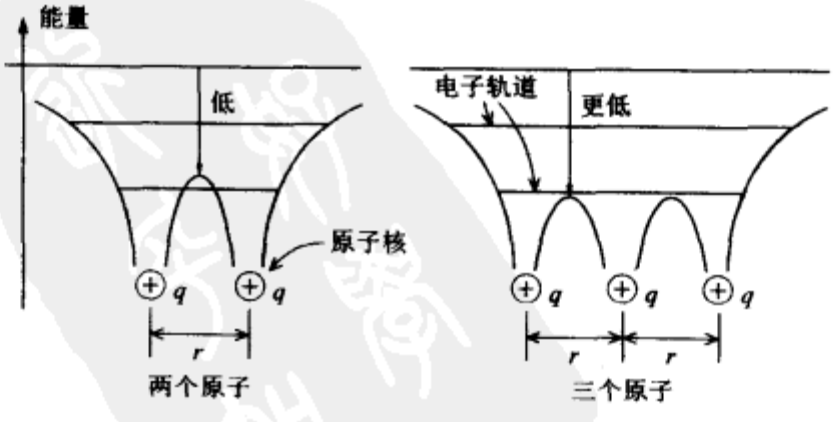


图 2.9 势能的变化

关于能带图

允带

由于轨道分裂而形成的能带被称为**允带**。允带能够容

禁带
带隙
能带结构

纳电子。不是允带的地方称为**禁带**。禁带的宽度称为**带隙**(band gap)。另外，把**禁带**和允带的存在方式称为**能带结构**。数个孤立原子集聚起来时，电子轨道分裂并形成能带。它的这种状态，当取 x 轴为原子间距、y 轴为能量时，可用图 2.11 进行描绘。

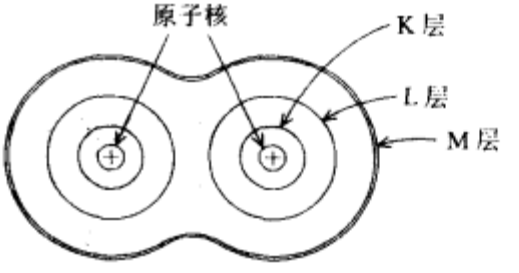


图 2.10　两个相接近原子的共同轨道

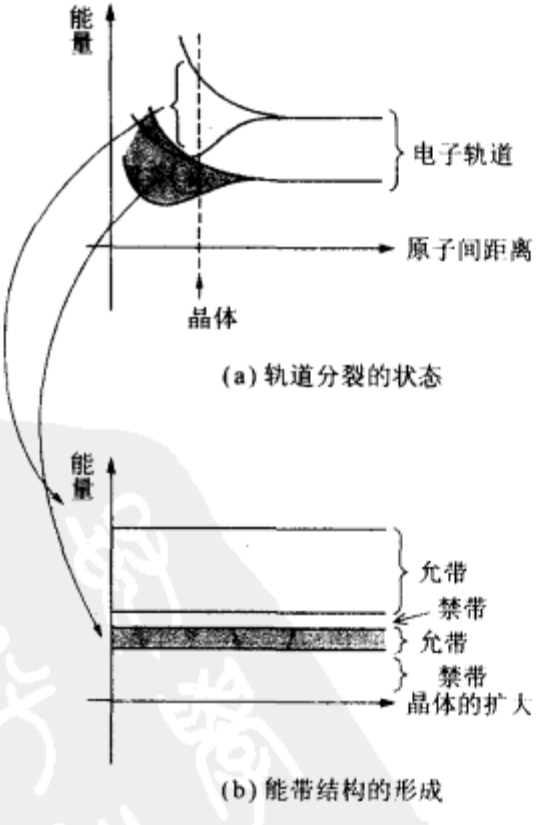


图 2.11　能带

4 晶体中电子的运动

要 点

物质之所以成为金属、绝缘体、半导体，是由能带的状态来决定的。电子占据某一能级的概率可用费米·狄拉克分布函数给出。

解 释

金属、绝缘体和半导体的区分

价电子带
导带

将由最外层轨道分裂而形成的允带称为**价电子带**。价电子带上的允带称为**导带**。当价电子带的所有轨道上不能都填满两个电子时，这种物质就是导体。价电子带的所有轨道上都被两个电子填满时，这种物质就是绝缘体。这和满员电车里人不能随意移动是相似的。

自由电子
空穴

在硅半导体里，价电子带的所有轨道都被电子填满，可是它的带隙宽度与绝缘体相比很窄(约 1eV)，所以一有热激励，就能使某一电子从价电子带跃迁到导带上。跃迁到导带上的电子，因为能够在允带中自由移动，所以称此种电子为**自由电子**。另一方面，价电子带中的电子跳出之后就形成**空穴**。空穴如同正电荷粒子一样也可以在价电子带中移动(见图 2.12)。

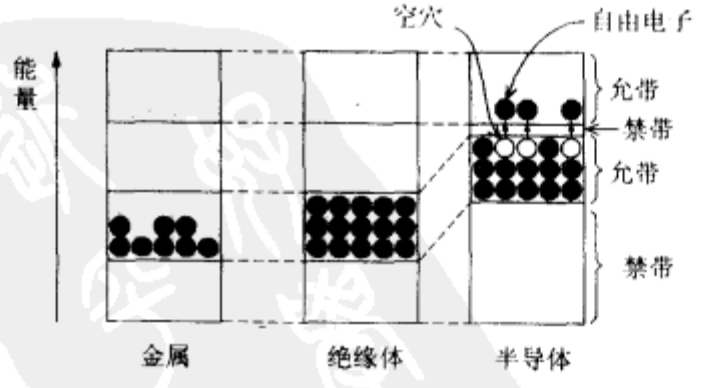


图 2.12 晶体的能带

费米能级

研究一下价电子带能级只有一半被电子填满的能带。如果温度是绝对零度，这时因为电子不受热激励，所以电子从能量低的能级按顺序，每一能级进入两个。每一能级进入

两个电子是根据泡利不相容原理得出的。这时把电子占据的最高能级称为**费米能级**。称这个能级的能量为**费米能量**（见图 2.13）。

费米能级

费米能量

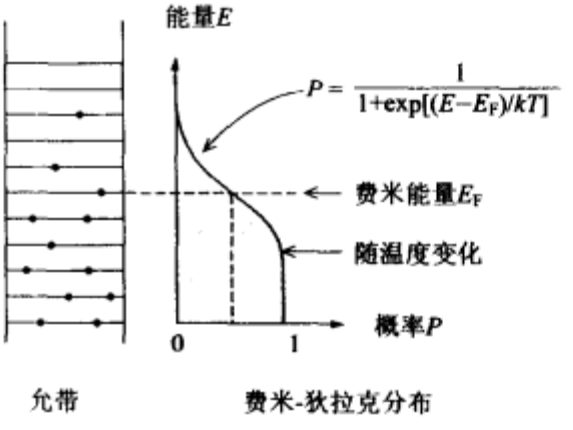


图 2.13　电子的存在概率

如果温度高出绝对零度，这时，电子受热激励就占据比费米能级更高的能级。给出这种电子占据概率的是**费米-狄拉克的分布函数** P，它如下式所示：

费米-狄拉克的分布函数

$$P=\frac{1}{1+\exp[(E-E_F)/kT]}$$

上式中 k 为玻尔兹曼常数。

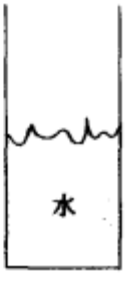


图 2.14　水的振动

如图 2.14 所示，这个分布函数与倒入容器中的水由于振动而发生起伏波动的现象相似。容器不振动就相当于温度是绝对零度的状态。

相关知识

◆ 关于堆积

把货物打包称为包装(packing)，现在把原子类比为球，研究一下它们的堆积方法。物质，即使是元素相同，由于其排列方法不同也会表现出各种不同的性质。由球构成结构的单元是晶格。面心立方晶格和最密六方晶格被称为最密堆积，也就是缝隙最小的堆积法。虽然金刚石结构不是最密堆积，可是以金刚石为主的很多物质都采取这种原子排列。半导体并非都是单质物质，化合物砷化镓也是半导体，它也具有金刚石结构。

5　本征半导体及其性质

要　点

完全不含杂质的半导体称为本征半导体。本征半导体的自由电子和空穴浓度是相同的。费米能级处在禁带的中间。本征半导体的电阻率在温度升高时减小。

解　释

本征半导体的晶体结构

本征半导体

完全不含杂质的半导体称为**本征半导体**。最具代表性的本征半导体有单质的硅(Si)和锗(Ge),有化合物的砷化镓(GaAs)等。图 2.15是由硅构成的本征半导体的模型。各个原子都相互有 4 个价电子连结,而形成共价键。半导体的共价键能形成金刚石结构,其平面图如图 2.15 所示。半导体的价电子带因为是电子轨道都被电子充满的价带,所以,电子很容易从邻近原子移动到空穴中去。自由电子和空穴担负着导电的任务,所以称其为**载流子**。因为空穴是价电子跳出的位置,所以在本征半导体情况下,自由电子和空穴的载流子浓度是相同的。

载流子



图 2.15　本征半导体的晶体结构

能带结构

图 2.16 给出了本征半导体的能带和费米-狄拉克分布函数。带隙约有 1eV 左右,在室温下所有电子都不能跨越这个带隙。热激励到导带上的电子数,其概率可用费米-狄拉克分布函数给出。**费米能级**是以绝对零度为界并形成一

费米能级

个台阶状。因为费米能级也是电子具有能级的平均值，所以，在本征半导体的情况下，能级的平均值处在禁带的中间。

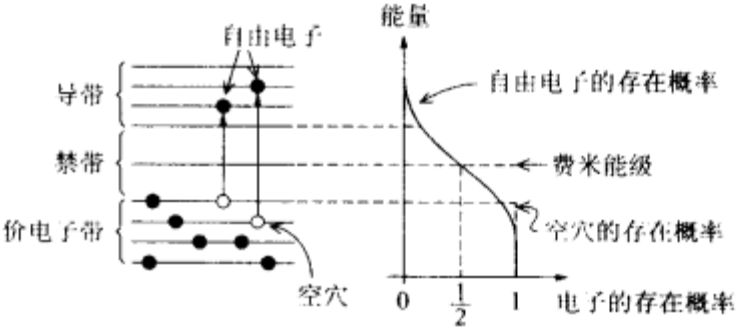


图 2.16　本征半导体的能带

本征半导体的导电机理

漂移电流

把由于电场原因而引起的电流称为**漂移电流**。本征半导体受热激励的自由电子和空穴是以载流子的形式给出的。在半导体上加一电压，由于电场关系，自由电子向电源正极移动，而空穴向电源负极移动。假如自由电子和空穴相遇，它们则会复合而灭失。另外，假如受热激励而产生自由电子，那么与此同时，也会产生空穴（见图 2.17）。

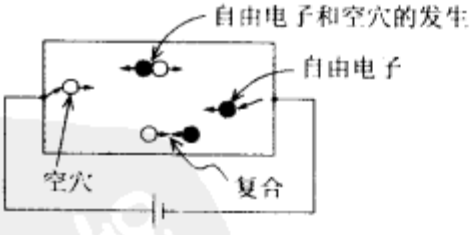


图 2.17　本征半导体中载流子的迁移

本征半导体中起导电作用的是载流子（自由电子和空穴）。本征半导体的载流子是由热激励而产生的，它的浓度随温度的上升而增加。但是与此同时，也会出现妨碍导电的

晶格振动

晶格振动。晶格振动是受热激励的原子振动。因此，这种障碍会随着温度的上升而加剧。不过，当载流子的增加大于由晶格振动而引起的障碍时，就会对导电有利。因此，半导体的电阻率随温度增加而减小。

在金属情况下，参与导电的载流子只有自由电子。因为

这种自由电子的浓度即使温度上升也不改变，所以金属的电阻率是随温度上升而增加的（见图 2.18）。流过半导体的电流中除上述电流之外还有**扩散电流**。扩散电流是由载流子浓度之差引起的。

扩散电流

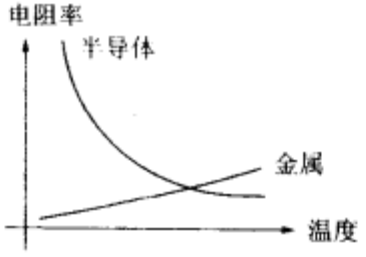


图 2.18 电阻率随温度的变化

6　p 型半导体及其性质

要　点

p 型半导体中空穴是多数载流子。杂质能级处在紧靠价带的上边。费米能级处在禁带中间之下和杂质能级之上。

解　释

p 型半导体的晶体结构

杂质半导体

将本征半导体中添加(doping)极微量的某种杂质的半导体称为**杂质半导体**。添加的杂质在禁带中形成一个新杂质能级。其结果是产生新的空穴和自由电子。杂质半导体根据添加杂质的价电子数决定形成 p 型半导体或形成 n 型半导体。

p 型半导体

p 型半导体(p-type semiconductor)是添加三价杂质元素的情况。添加的三价杂质元素(In),使硅原子共价键缺了 1 个价电子(见图 2.19)。价电子缺少的地方就成为空穴,空穴能够从相邻原子接受电子。这时,称添加的杂质为**受主**(acceptor)。另外,将这种杂质半导体称为**p 型**半导体,而且空穴成了多数载流子。

受主

p 型

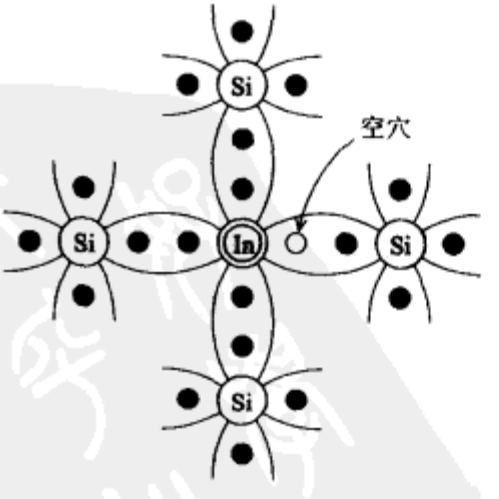


图 2.19　p 型半导体的晶体结构

p 型半导体的能带

图 2.20 是用能带描绘空穴发生的情形。由受主形成的杂质能级称为**受主能级**。价电子带的电子很容易被激励到

受主能级

受主能级上。这是因为受主能级处在紧靠价电子带的上边。又因为费米能级是电子具有能级的平均值，所以受主能级在禁带中间之下，在杂质能级之上。

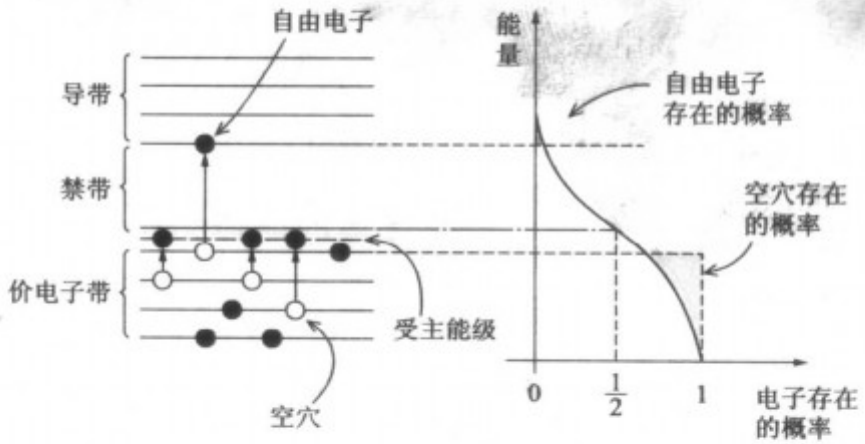


图 2.20 p型半导体的能带

漂移电流

少数载流子
多数载流子

尽管p型半导体也有自由电子，可是与空穴相比因为少得多，故称自由电子为**少数载流子**。与此相对应，因为空穴比电子多，故称其为**多数载流子**。

在p型半导体上一加电压，空穴就成为电流的主体。因为空穴被认为是正电荷粒子，所以它向电池的负极移动。自由电子则正相反，它向正极移动(见图 2.21)。

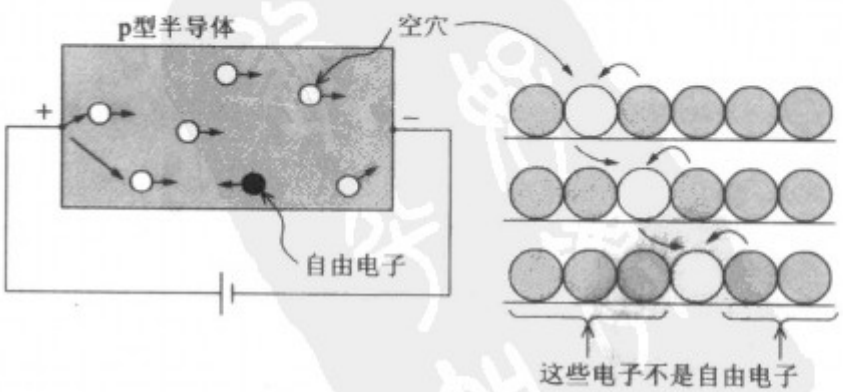


图 2.21 p型半导体中载流子的迁移

7　n型半导体及其性质

要　点

n型半导体中自由电子是多数载流子。杂质能级位于紧靠导带的下方。费米能级位于禁带中间之上、杂质能级之下。

解　释

n型半导体的晶体结构

n型半导体

n型半导体(n-type semiconductor)中的杂质是5价元素。如果在本征半导体硅中添加极微量的5价砷(As)杂质，如图2.22所示，每个砷(As)原子有一个价电子不参与形成共价键。称含这种杂质的半导体为**n型**半导体。这时将添加的杂质称为**施主**(donor)。施主过剩的价电子能很容易逃脱原子的束缚而自由移动。这种由杂质提供的价电子，就成为n型半导体的多数载流子。

n型
施主

价电子逃脱后的砷原子虽然带正电，但它是不能移动的固定电荷。n型半导体只是起到使多数载流子成为自由电子的作用，这点和p型半导体相同。

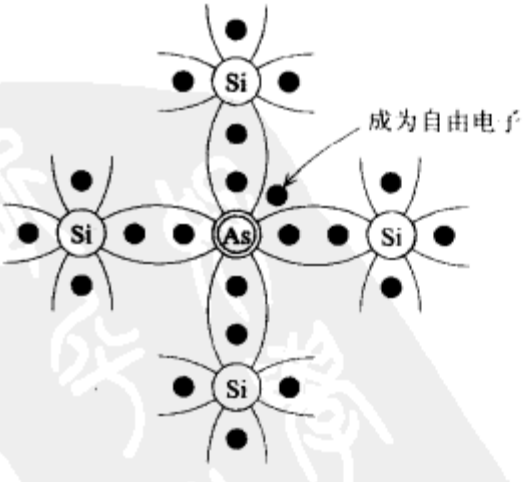


图2.22　n型半导体的晶体结构

能带结构

图2.23是用能带来描绘自由电子产生的情形。由施主形成的杂质能级称为**施主能级**。从施主能级很容易将电子

施主能级

激励到导带上。受激励的电子在导带中成为自由电子。因为费米能级是电子具有能级的平均值，所以它位于禁带之上，而位于杂质能级之下。

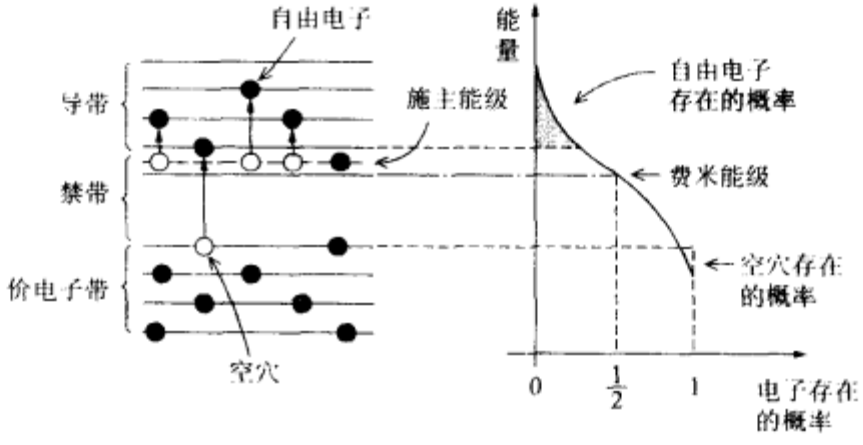


图 2.23 n 型半导体的能带

漂移电流

如图 2.24 所示，在 n 型半导体上施加电压，自由电子受电场力的吸引移向电源正极。从半导体中逃脱的自由电子，因为可由电源补充，故晶体仍保持电中性。

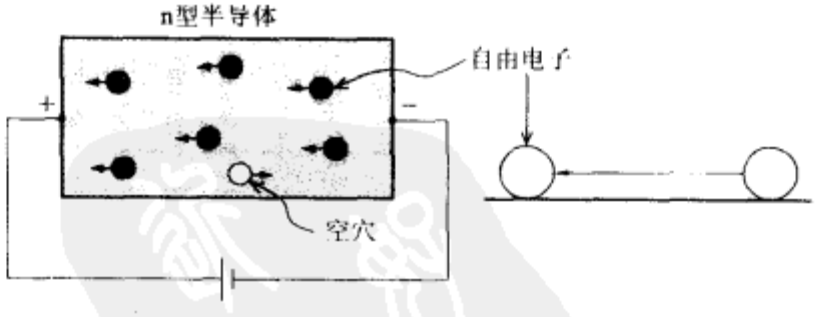


图 2.24 n 型半导体中的载流子的迁移

相关知识

◆ 载流子的迁移率

自由电子和空穴这两类载流子的迁移率(单位电场力作用下载流子的迁移速度)是不同的。虽然杂质浓度和温度条件相同，可是 n 型半导体的电阻率比 p 型的小。这是由于自由电子比空穴的迁移率大的缘故。所以自由电子作为

载流子比空穴更容易移动。因为空穴是电子逃脱的空位，所以移过来的相邻电子又不能不在空穴中停留，而导带中的自由电子可不停止地进行移动。如用火车来比喻，这和各站都停车的火车与特快的火车不同相类似。

载流子的迁移率决定电子元、器件的工作速度。自由电子的迁移率比空穴大，这就是半导体元、器件向 n 型半导体发展的原因。

◆ 迁移率

将单位时间通过单位面积的电荷总量定义为电流密度 j。如果物质中单位体积中载流子浓度为 n，载流子迁移速度为 v，每个载流子的电量为 e，那么

$$j = nve \tag{2.6}$$

这里载流子的迁移速度 v 是由电场决定的漂移速度。这个速度在电场小时，与电场大小成正比。因此，

$$v = \mu E \tag{2.7}$$

式中的 μ 为迁移率。μ 就是加单位电场时的载流子的迁移速度（见图 2.25）。

迁移率 μ 的单位是 $(m/s)/(V/m) = (m^2/V \cdot s)$。下面来比较一下硅在温度为室温（300K）情况下的自由电子和空穴的迁移率。在电场为 1V/m 时，它们大约为

自由电子的 $\mu = 0.15 m/s$

空穴的 $\mu = 0.05 m/s$

如果换算成时速，μ 分别为 0.54km/h 和 0.18km/h 左右。

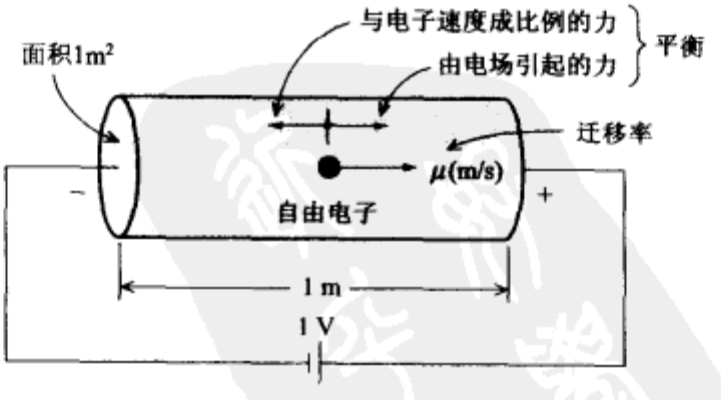


图 2.25　迁移率

8　二极管的结构及其工作原理

要　点

pn结二极管是将p型半导体和n型半导体在单晶中做成相邻接的结构。在pn结处由于载流子扩散而有电位势垒产生，施加电压后，势垒厚度就会发生变化。

解　释

pn结二极管的结构

二极管

二极管(diode)意味着是两个电极的元件。pn结二极管是在单一的半导体晶体中制成p型区和n型区相邻的结构。

pn结

将p型区和n型区的结合面称为**pn结**。在pn结处，即使不在两电极加电压，由于扩散作用也有载流子移动。p型区的多数载流子(空穴)向n型区扩散，n型区多数载流子(自由电子)向p型区扩散。扩散的空穴和自由电子由于复合而消失。消失之后，留下带电的杂质原子。其结果在接合面附近形成了载流子不存在的区域。称这个区域为**耗尽层**(或过渡层)。另外，将移动到对方区域的载流子称为**注入载流子**。

耗尽层

注入载流子

在载流子缺少的耗尽层中，p型区内杂质带负电；n型区内杂质带正电。因为这些带电的杂质不能移动，故称其为**固定电荷**。这些固定电荷在pn结处产生了电位差。这个电位差阻碍载流子的移动，所以，称其为**势垒**，其大小称为**势垒电压** Φ(见图2.26)。

固定电荷

势垒

势垒电压

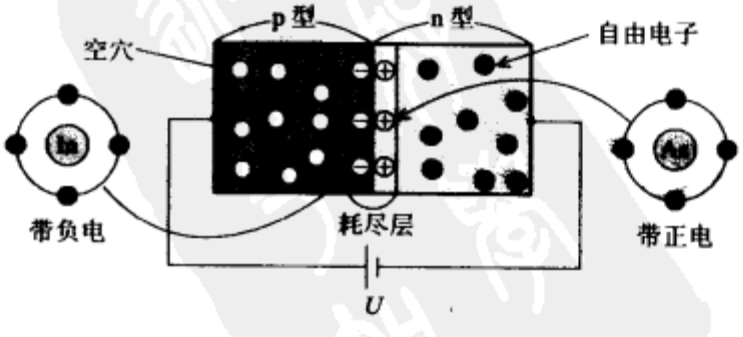


图2.26　pn结二极管的结构

能带结构

偏压

称加在pn结上的直流电压为**偏压**。不加偏压时，在能

带结构上，费米能级在p型区和n型区是相等的(见图2.27)。这时即使用导线连接两电极也没有电流。这是因为在pn结处有势垒，载流子的自由电子和空穴不能迁移到对方区域。这种情形可以比喻为由水管连接着的两个水槽，水位相当于费米能级，如果两个水槽的水位相等，水(相当于载流子)就不流动(见图2.28)。

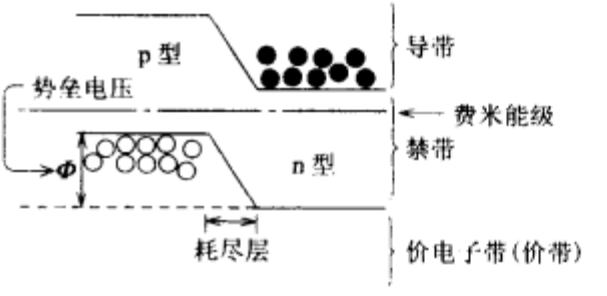


图2.27　能带

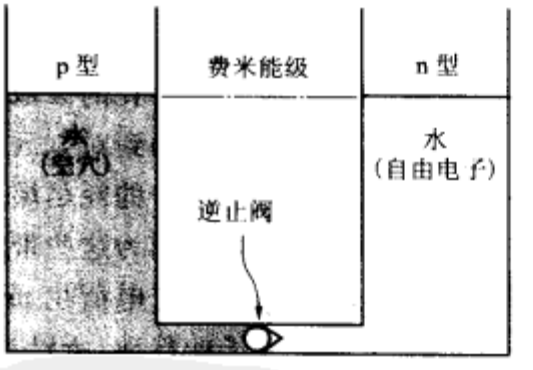


图2.28　费米能级的比喻

二极管的符号

图2.29给出了二极管的符号。实际的二极管中，箭头方向表示它导通的方向。

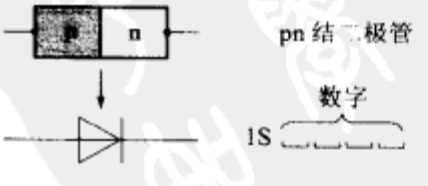


图2.29　二极管的符号和型号

9　二极管的特性和使用方法

要　点

二极管具有整流作用，对于反方向电压有击穿现象发生。二极管都有工作参数的最大额定值。

解　释

整流
二极管
阳极
阴极
正向偏压
反向偏压

二极管的特性

只让电流向一个方向流动称为**整流**。人们将进行整流的电子元件叫**二极管**。二极管是用半导体的 pn 结制成。把连接 pn 结的 p 侧的电极称为**阳极**(anode)，连接 n 侧的电极称为**阴极**(cathode)。对阳极加正电压，阴极加负电压时，称加**正向偏压**。与此相反，阳极加负电压，阴极加正电压时，称加**反向偏压**。二极管的功能因为是单向通过电流，所以在理想情况下，正向加电压时电阻为零，反向时，电阻为无限大。正向电流因为势垒电压的关系，所以它不能随电压立即增加。在反向情况下，这时有由于少数载流子而引起的微小电流和可能出现被称为齐纳击穿的击穿现象发生。击穿现象是由于过高的反向偏压而引起 pn 结被击穿所致。引起击穿现象的电压称为**击穿电压**(见图 2.30)。

击穿电压

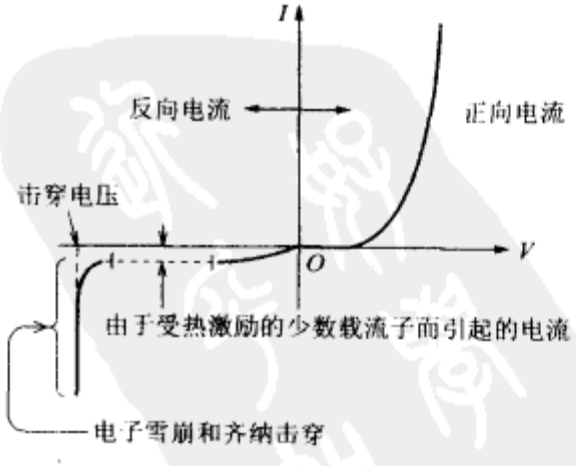


图 2.30　二极管的特性

二极管的最大额定值

为了保证二极管能正常而安全地使用，人们对它的电流

和电压及使用温度都规定了使用的上限。把这个界限值称为**最大额定值**。

最大额定值

能带结构

对二极管加正向偏压时，p 型区域的费米能级与 n 型区域相比相对降低了，偏压使势垒电压减小，其结果，多数载流子的自由电子和空穴能够很容易移动到对方区域（见图 2.31）。

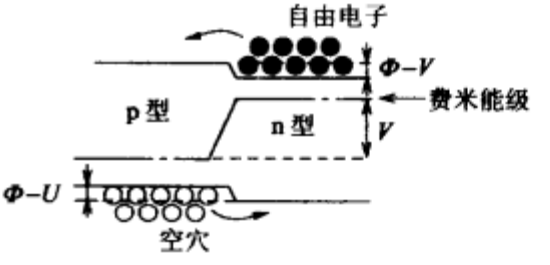


图 2.31　能带结构（加正向偏压时）

反过来加反向偏压时，p 型区域的费米能级与 n 型区域相比相对增加了，偏压使势垒电压增加了。其结果，多数载流子的自由电子和空穴不能移动到对方区域。但是，对于由热激励而产生的少数载流子的自由电子和空穴来说，因为这个偏压是正向的，所以能使它们移动到对方区域。自由电子能够从费米能级高的区域流向低的区域，空穴能从费米能级低的区域流向高的区域（见图 2.32）。

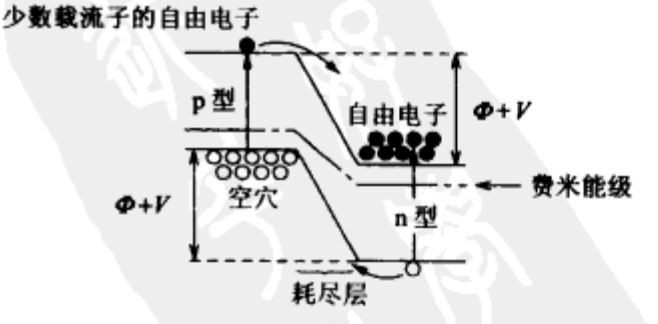


图 2.32　能带结构（加反向偏压时）

相关知识

◆ 其他二极管

除了用于整流的二极管外，还有用于产生固定电压的齐纳二极管（zener diode）和用于光电检测的光电二极管（photodiode）以及当电流流过时能发光的发光二极管（LED：Light Emitting Diode）等很多种。

10　晶体管的基本构造

要　点

晶体管是把 p 型和 n 型半导体配置成 pnp 或 npn 三层而制成的。分别把这三层称为发射极、基极和集电极。发射极和基极之间加正向电压，基极和集电极之间加反向电压。

解　释

双极晶体管

双极(bipolar)晶体管的结构

本节所介绍的晶体管称为**双极晶体管**。之所以叫作双极型，是因为它是由两种类型的载流子(自由电子与空穴)进行工作的。如果只说晶体管通常即是指双极型的。晶体管是在单晶中制成两个 pn 结(见图 2.33)。这两个 pn 结是由一个单晶制成的，所以即使把两个二极管连接起来也不能成为晶体管。

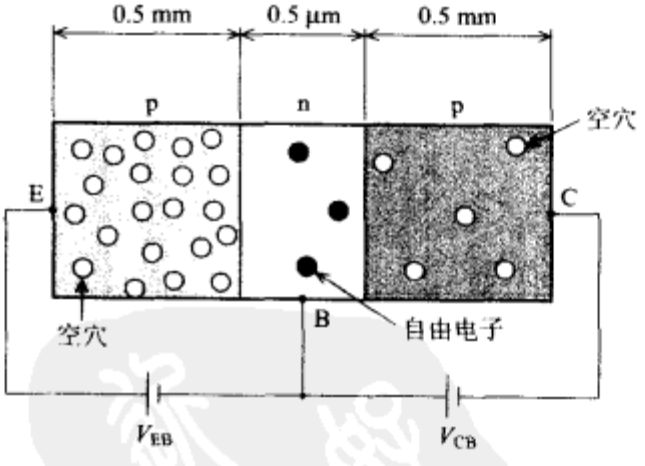


图 2.33　晶体管的结构

载流子浓度可使发射区变宽。当发射区的载流子浓度低时，就不能将载流子向基极区充分注入。同时，基极区窄有助于注入载流子的扩散。

能带结构

晶体管的能带结构可以认为是二极管能带的应用。不加偏压时，费米能级在发射区、基区和集电区是相同的。费米能级相同，载流子由于 pn 结处的势垒关系，就不能移动

(见图 2.34)。

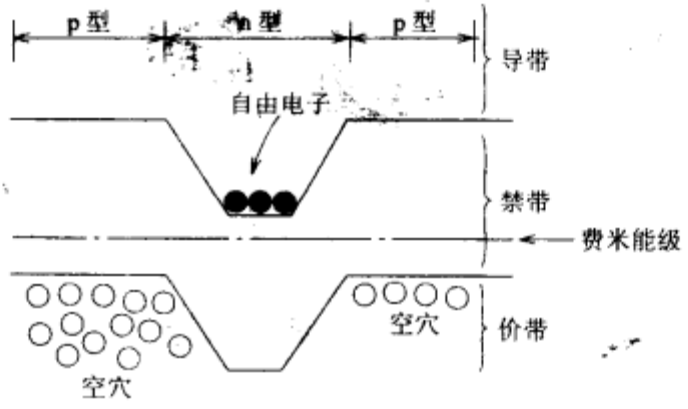


图 2.34 未加偏压时的能带结构

加了偏压后,各区域的费米能级产生了级差。称发射区和基区之间的结合部为**发射结**。在发射结加上正向偏压时,发射区的费米能级相对基区降低了。称集电区和基区的结合处为**集电结**。在集电结加上反向偏压时,集电区的费米能级相对基区增高了(见图 2.35)。

发射结

集电结

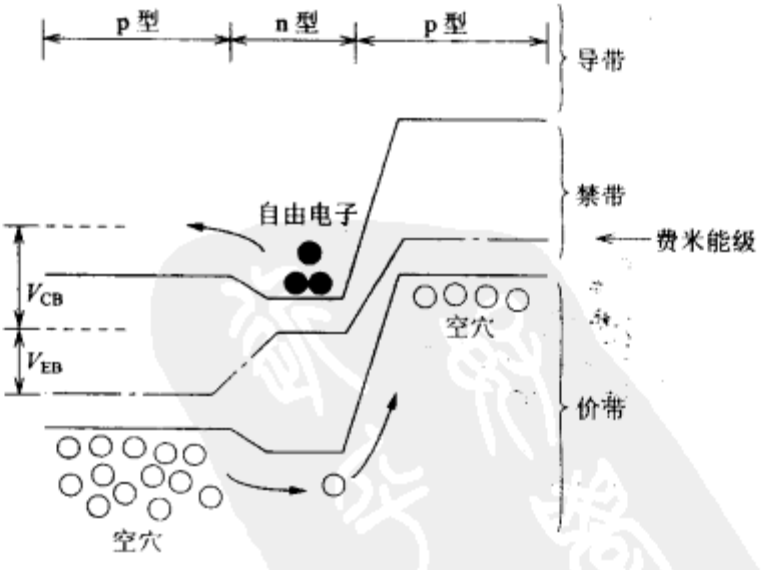


图 2.35 有偏压时的能带结构

11　晶体管的工作原理和静态特性

要　点

晶体管是由两种载流子进行工作的。基极电流控制着集电极电流。晶体管的静态特性是表示晶体管的输入和输出关系的。晶体管有放大作用。

解　释

载流子的移动

晶体管和 pn 结二极管一样，其载流子是自由电子和空穴。现在来看一下有关 npn 型晶体管的工作。晶体管的工作，可以看作是 pn 结二极管的应用。所以，这里把连接基极的电极分成两部分来看（见图 2.36）。图中因为是在发射极和基极之间的 pn 结上加正向偏压，所以有多数载流子流动。另一方面，因为是在集电极和基极之间的 pn 结上加反向偏压，所以没有看到多数载流子流动。但是从发射极所注入的自由电子由于扩散流过基区，最后可到达集电区。因为在集电极加了大的正偏压，所以由扩散而移动的自由电子，被集电极吸引而产生了集电极电流。

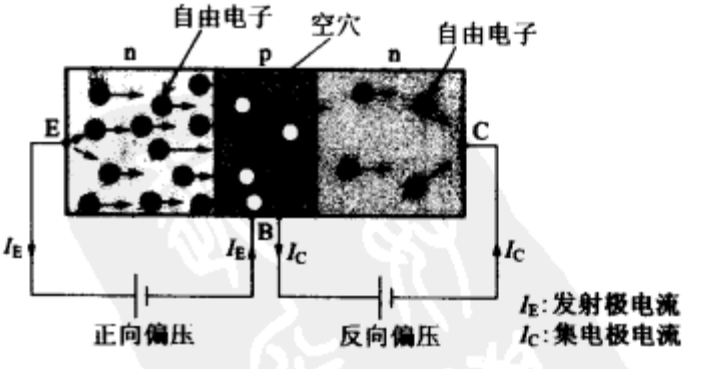


图 2.36　载流子的移动

能带结构

加偏压时 npn 型晶体管的能带是怎样的？npn 型的情况也可和 pnp 型一样进行考虑。因为发射极和基极之间加了正向偏压，所以发射区的费米能级相对基极增高了。其结果，发射极的自由电子大量注入到基极。因为集电极和基极

之间加了反向偏压，所以集电极的费米能级相对基极降低了。其结果，经基区扩散出来的自由电子由于强电场关系，被吸引到集电极（见图 2.37）。

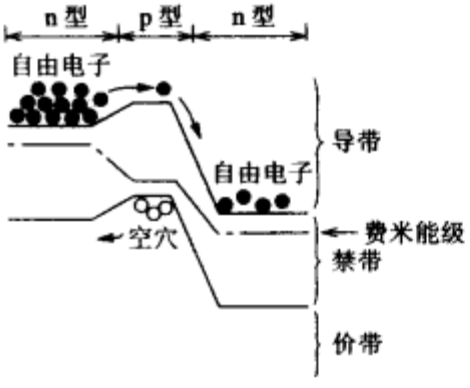


图 2.37 能带结构

发射极向基极注入自由电子时，就造成了发射极带正电，基极带负电。因为 p 型半导体和 n 型半导体原本都是电中性的，假如一会儿载流子流入，一会载流子流出，那么就会感到它们好像带电似的。但是，因为有偏压电源，所以晶体总是保持电中性。这是因为从晶体流出自由电子（或空穴）后的缺少部分可从电源得到补充。关于再复合而消失的情况也和上述情况相同。

静态特性的考虑方法

静态特性
动态特性

输出（电压与电流）与输入（电压与电流）的相对关系称为电路特性。当输入为直流时，这种输出与输入关系就是**静态特性**。输入为交流时，称其为**动态特性**。为了用图解给出输入（电压、电流）与输出（电压、电流）的关系（见图2.38），下面来讨论晶体管特性，可如图 2.39 所示那样取坐标轴。



图 2.38 网络的输入与输出



图 2.39 静态特性的表示方法

输出特性
电流传输特性
输入特性
电压反馈特性

第一象限表示输出电压和输出电流的关系，称其为**输出特性**。第二象限表示输入电流和输出电流的关系，称其为**电流传输特性**。第三象限表示输入电流和输入电压的关系，称其为**输入特性**。第四象限表示输出电压和输入电压的关系，称其为**电压反馈特性**。

在发射极、基极和集电极之中，由于把它们作为输入端和输出端的不同而静态特性亦不同。输入端和输出端的选法不同，决定着放大的种类（电压放大或电流放大）不同。

晶体管的静态特性

晶体管的静态特性，随着以哪个极作为输入、输出端和接地端的不同而不同。将基极作为输入，集电极作为输出和发射极作为接地的使用方式称为**发射极接地**。在发射极接地情况下，电压和电流都能放大。这里举出一个经常使用的发射极接地的静态特性实例（见图 2.40、图 2.41）。

发射极接地

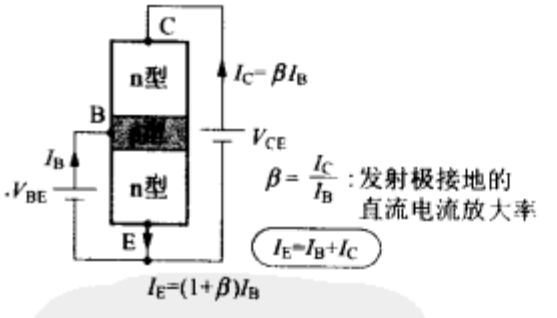


图 2.40　晶体管的发射极接地

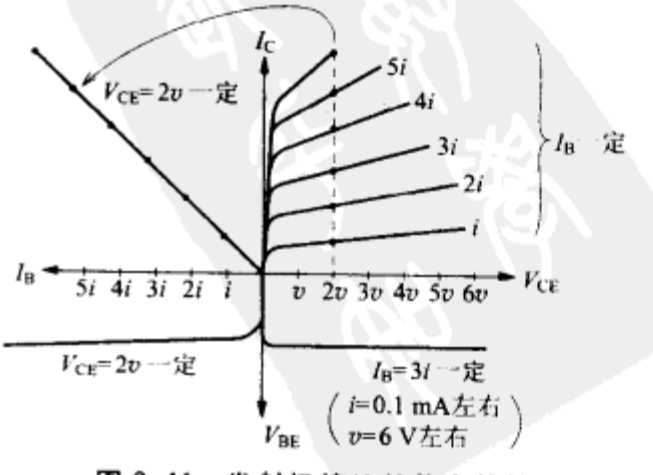


图 2.41　发射极接地的静态特性

集电极的断路电流

第一象限是输出特性。这个特性中，当输入端的基极电流 I_B 为零时，输出端的集电极电流 I_C 不等于零。这是由少数载流子所形成的电流，称其为**集电极的断路电流**。再在发射结上加上由集电极电压 V_C 而形成的正向偏压时，即会对载流子的注入造成影响，于是特性曲线向右上方抬起。第二象限是电流传输特性。在输出特性上，把集电极电压固定不变后，如能读出集电极电流 I_C 就可得到这一特性曲线。

第三象限是输入特性，和二极管的正向特性基本上一样。因为这种特性几乎不受集电极电压的影响，所以可用一条曲线画出。第四象限是电压反馈特性。在输入特性上，将基极电流固定不变后，如能读出基极电压 V_{BE}，就可求得这一特性曲线。

相关知识

◆ 能够放大的原因

将发射极作为输入端、集电极作为输出端、基极作为接地端的使用方式称为基极接地。在基极接地情况下，虽然不能进行电流放大，但能够进行电压放大。流过发射极的电流恒等于基极电流和集电极电流之和。作为晶体管特性来说，令发射极电流的大小为 1，这时的集电极电流的大小用 α 表示，称 α 为基极接地的直流电流放大倍数（见图 2.42）。因为 α 最大是 1，所以不能进行电流放大，但是能够进行电压放大。

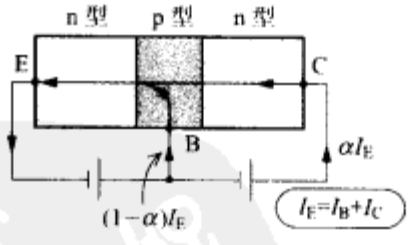


图 2.42　电流放大倍数 α

因为在发射极和基极之间是正向偏压，所以输入电阻较小（约数百欧[姆]）。可是另一方面，因为集电极和基极之间是反向偏压，所以输出电阻较大（约 1MΩ）。因此，输出侧的负载可以使用大的电阻。之所以能够放大电压，是由于输入电阻和输出电阻的大小不同的缘故。

例如，输入电阻为 300Ω，与集电极相连接的负载电阻为 30kΩ，设 $\alpha=0.99$。如果让发射极电流变化 ΔI_E，那么发射极和基极之间的电压微小变化 ΔV_i 和负载电阻上的电压微小变化 ΔV_o 分别为

$$\Delta V_i = 300 \times \Delta I_E, \qquad \Delta V_o = 30000 \times 0.99 \times \Delta I_E$$

于是，电压增益为 $\dfrac{\Delta V_o}{\Delta V_i} = 99$（倍）。

12　实际晶体管

要　点

让电流沿箭头方向流动那样加上偏压，而且必须不超过最大额定值。按照规格参数表来选择与用途相对应的晶体管。

解　释

晶体管的符号和型号

不同的晶体管按它的型号来区分。型号是以JIS(日本工业标准)为基础来确定的。这些都在JEITA(日本电子信息技术产业协会)进行了注册。不管是pnp型还是npn型都按高频用和低频用来分类。可是实用当中高频用和低频用的区别并不明显。一般根据厂家推荐的用途来选用。

晶体管的符号如图2.43所示。这种图形符号据说最初是对制造的点接触型晶体管所定的符号。电路图中并不注明E、B、C记号。带箭头的端子是发射极，偏压要按照让电流沿箭头方向流动那样来施加。

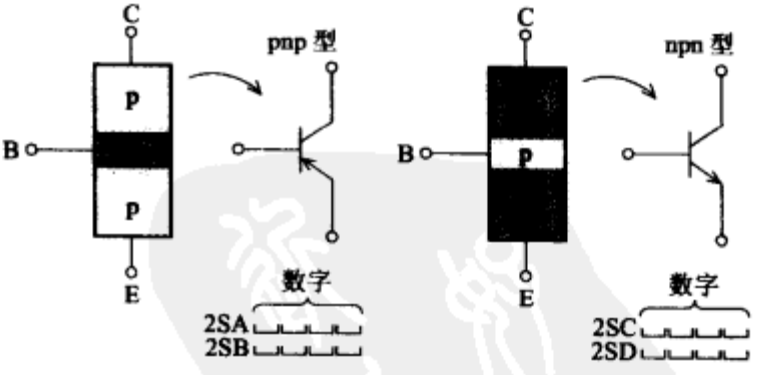


图2.43　晶体管的符号和型号

晶体管的外形图

图2.44给出了晶体管外形图例。外形图随品种的不同而不同。另外，即使是相同的外形名称，电极的连接也随厂家的不同而不同。实用当中，使用晶体管时，必须参照厂家的外形图来确认电极。

晶体管的最大额定值

为了维持晶体管特性和安全使用，首先要确定出最大的额定值。所谓最大额定值就是使用时一定不能超过的电流、电压、功率和温度等的最大允许值。电压的额定值是以击穿电压为参考来决定的。电流的额定值是考虑 pn 结的温度和直流电流放大倍数的变化等来决定。集电极电压和集电极电流之积 P_C 称为**集电极功率损耗**。最大额定值也由 P_C 来决定(见图 2.45)。

集电极功率损耗

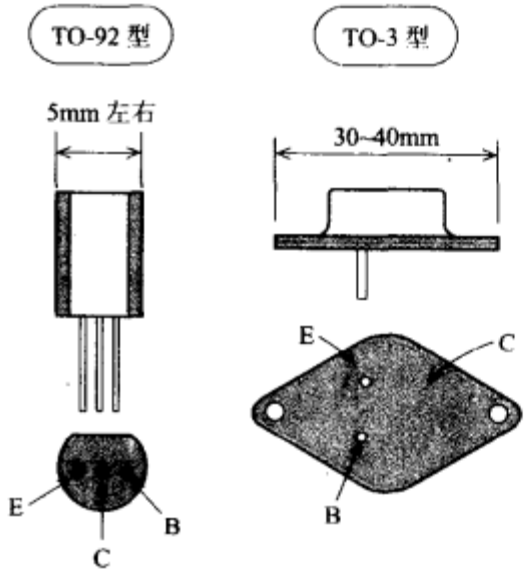


图 2.44　晶体管的外形

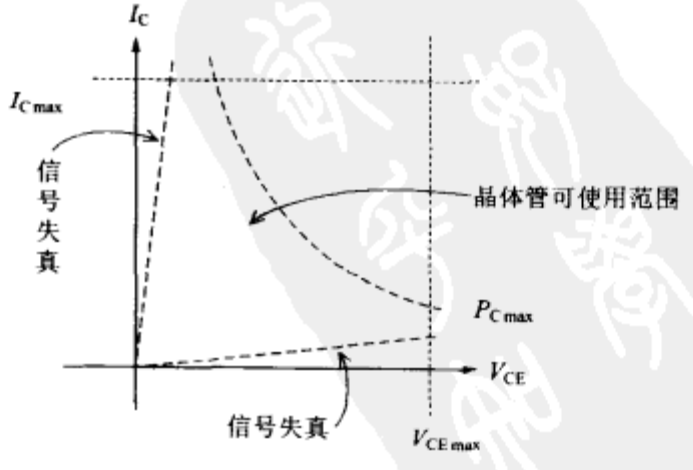


图 2.45　晶体管的可使用范围

13　结型 FET

要　点

结型 FET 用 pn 结上产生的耗尽层来控制沟道，并且是栅极电压控制漏极电流。输入阻抗很高。

解　释

结型 FET 的栅极结构

结型 FET 的栅极是用 pn 结制成。n 型沟道时，在 n 型半导体两端设置漏极和源极，在其中间制成 p 型半导体，并把它作为栅极。在栅极施加反向偏压，能使 pn 结面上的耗尽层变宽或变窄，从而控制载流子的移动（见图 2.46）。如果不断地增高反向电压，这时由于耗尽层的扩宽而使沟道不断变窄，最后完全变得阻塞。将沟道完全阻塞，载流子不能流动的状态称为夹断（pinch off）。而这时加在栅极上的电压称为**夹断电压**。

夹断电压

图 2.47 给出了结型 FET 的符号。

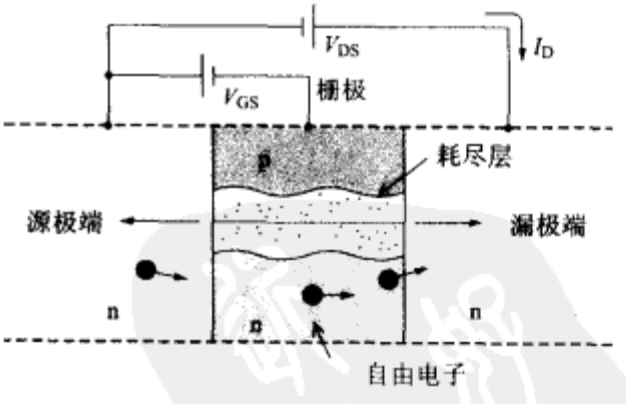


图 2.46　栅极结构的模型

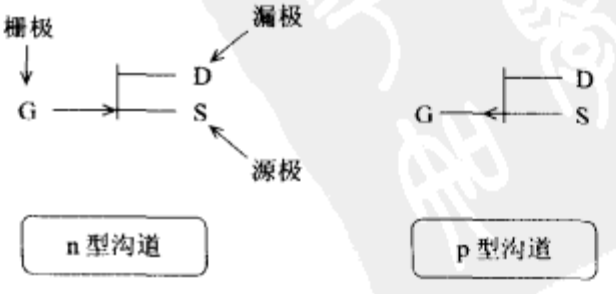


图 2.47　结型 FET 的符号

FET 的静态特性

第一象限是输出特性。漏极电流几乎不依靠漏极和源极间的电压。尽管漏极和源极之间的电压一定，如果栅极电压变化，那么因为漏极电流也会发生变化，所以输出特性曲线可用多条曲线描绘。

第二象限相当于双极晶体管的电流传输特性。横轴是栅极电压，纵轴是漏极电流。因为这个特性曲线中漏极与栅极之间的电压一定，所以该特性曲线和双极型晶体管时一样，可从输出特性曲线求得。在 FET 的传输特性中漏极电流是与栅极电压的平方成正比(见图 2.48、图 2.49)。

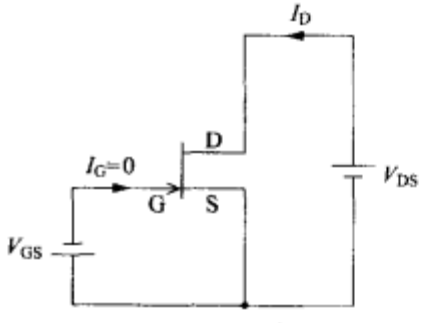


图 2.48 结型 FET 的电路

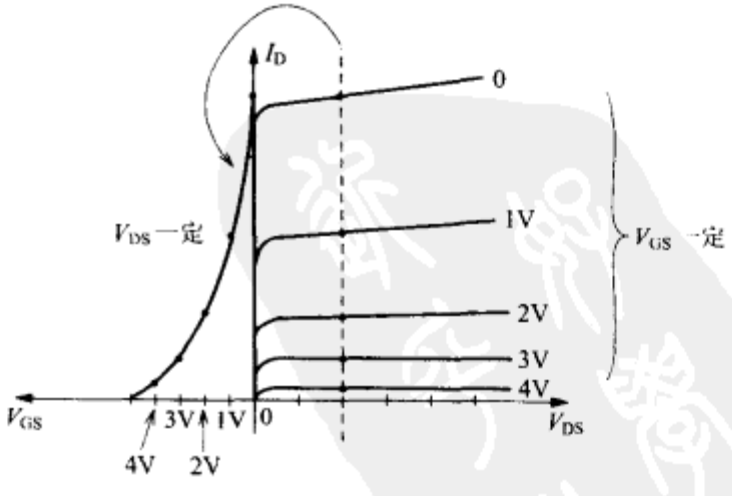


图 2.49 结型 FET 的静态特性

14　MOS 型 FET

要　点

MOS 型 FET 是利用绝缘体的介质极化来控制沟道。栅极是金属和绝缘体及半导体的三层结构。它有增强型和耗尽型两种。

解　释

MOS 型 FET

增强型 MOS FET 的栅极结构

MOS 型 FET 的栅极结构是在 p 型基片上制作出两个 n 型岛，再在此两岛间的表面上生成二氧化硅绝缘膜，然后在其上安装上电极。

如果如图 2.50 所示施加栅极电压 V_{GS}，则由于绝缘膜上产生的介质极化，p 型半导体的空穴将被推向电极的负端，而少数载流子的自由电子将向电极正端移动。其结果，在紧靠绝缘膜的下面产生了把 p 型反转成 n 型的区域。称这个区域为**反转层**。此反转层称为**沟道**，从漏极到源极的电流 I_D 即通过此沟道流通。MOS 型 FET 的漏极电流表现出与栅极和源极之间的电压平方成比例的特性。将出现反转层且将开始出现漏极电流的电压 V_T 称为**阈值电压**（或阈电压）（见图 2.51）。

反转层

沟道

阈值电压

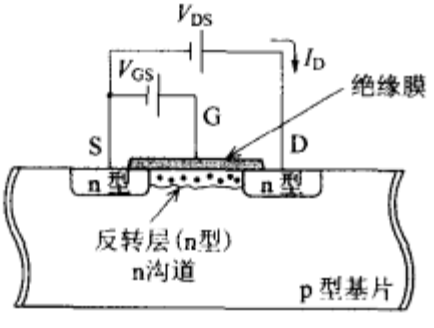


图 2.50　栅极结构的模型

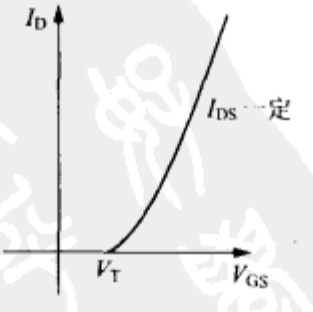


图 2.51　V_{GS}-I_D 特性

耗尽型 MOS FET 的栅极结构

耗尽型 MOS FET 的栅极结构也和增强型的很相似。不同的是相当于反转层的沟道是事先制作好的。

此沟道的宽窄随栅极电压的不同而扩展或缩小（见图

2.52)，I_D 也随之发生变化。

耗尽型 MOS FET 也表现出漏极电流与栅极电压平方成比例的特性(见图 2.53)。

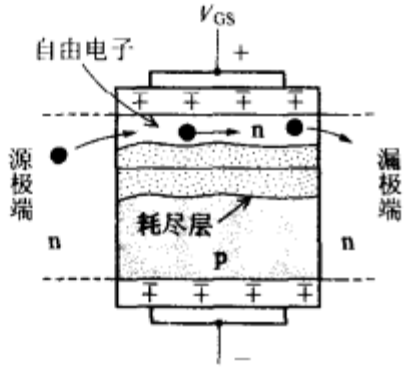


图 2.52 栅极结构的模型

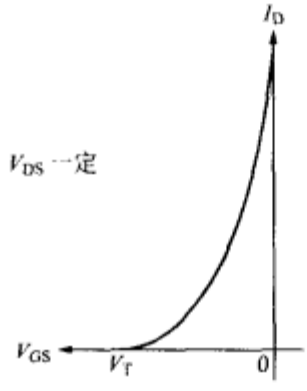


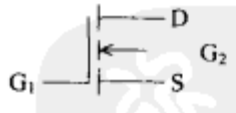
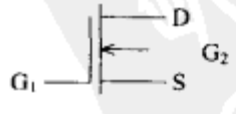
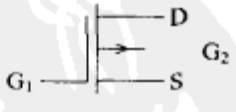
图 2.53 传输特性

pMOS nMOS 沟道为 p 型时称为 **pMOS**，为 n 型时称为 **nMOS**。

MOS FET 的符号

表 2.1 给出了 MOS FET 的符号。附有箭头的栅极端子 G_2，通常与源极相连接使用。n 型时箭头指向内侧，p 型时箭头指向外侧。

表 2.1 MOS FET 的符号

	n 沟道	p 沟道
增强型		
耗尽型		

相关知识

◆ 何为 CMOS

MOS FET 是晶体管，所以可单独作开关使用。p 型和 n 型还可以互补组合在一起作开关使用。这样的一对 MOS 即称为 CMOS(Complementary MOS)。这里，作为示例，图 2.54 举出了由 CMOS 构成的 NOT 电路(非门)。

其工作状况，看一下其等效电路（见图 2.55）即可明了。表 2.2 示出了其逻辑真值表。CMOS 的优点是耗电小且易于集成化。后面第 4 章的第 15 节还将对 NOT 电路做进一步讲解。

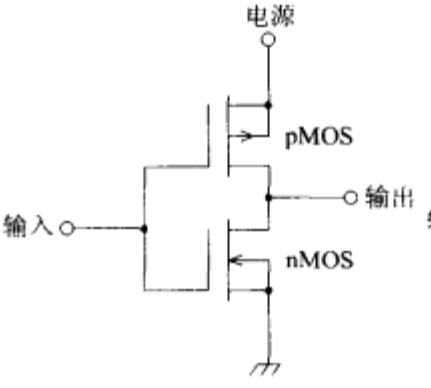


图 2.54　CMOS 构成的 NOT 电路

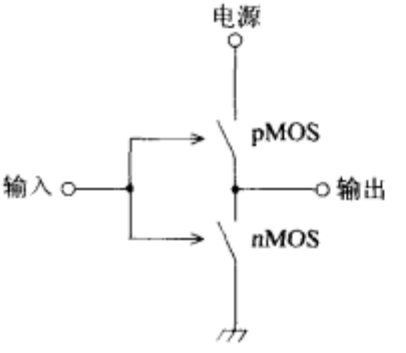


图 2.55　等效电路

表 2.2　真值表

输入	pMOS	nMOS	输出
0	ON	OFF	1
1	OFF	ON	0

◆ FET 的沟道与载流子

因为 FET 是由空穴或自由电子中的一种载流子工作，所以称它为单极晶体管（unipolar transistor）而第一代晶体管是由空穴和自由电子两种载流子进行工作，故称其为双极晶体管（bipolar transistor）。FET 内部的载流子通道称为沟道（channel）。控制沟道宽度的是栅极。此沟道有增强（enhancement）型与耗尽（depletion）型之分。增强型是施加栅极电压后沟道才能形成，所以也称常闭型（normally off）。耗尽型则与此相反。

15 集成电路

要 点

将芯片上的超小型的电子电路称为集成电路。将芯片上的电路元、器件数称为集成度，芯片的大小约为几毫米。集成电路有双极型和 MOS 型两种。

解 释

集成电路的结构

如果使用投影仪(projector)就能将幻灯片的图像放大，反过来，如果使用照像技术，也能将胶片上的图像缩小。在集成电路制造中也采用这种照像技术把很多电路元、器件缩入在约 5mm 见方的半导体芯片(chip)上。这并不是单纯地对电路图进行投影，而是要经过多道工序制造出电路元、器件，以及进行配线等。电路元、器件是以晶体管和场效应晶体管为主体，再使用二极管、电阻和电容等。

IC
双极型 IC
MOS 型 IC

集成电路也叫 **IC**(Integrated Circuit)。把以双极型晶体管为主体，而组装起来的电路称为**双极型 IC**。把以 MOS 型 FET 为主体的称为 **MOS 型 IC**。图 2.56 给出了双极型 IC 的断面结构模型。

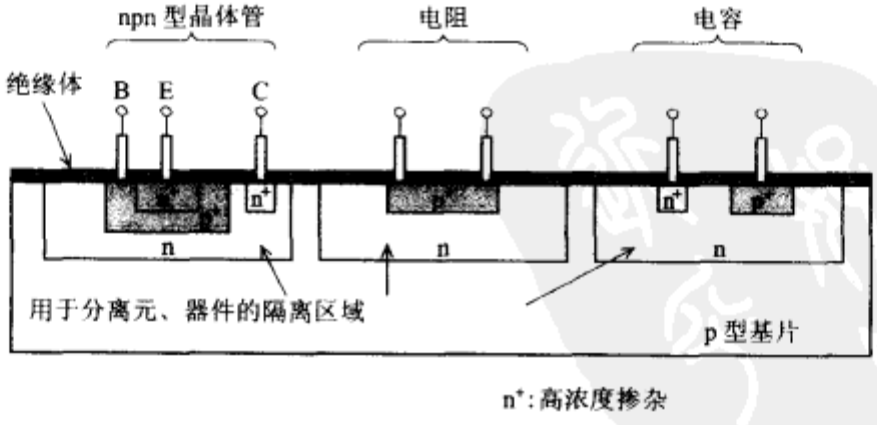


图 2.56 双极型 IC 断面结构

集成电路的分类

集成电路根据应用的不同可分成很多类型。现在分别从功能和结构角度上来看看它的分类。

从功能角度上看，集成电路可分为

- 通用和特定的；
- 逻辑元件、记忆元件和微处理器(microprocessor)；
- 模拟 IC 和数字 IC。

从结构角度上看，集成电路可分为

- 单片 IC(monolithic IC)和混合 IC(hybrid IC)；
- 双极型 IC 和 MOS 型 IC；
- 单质 IC 和化合物 IC。

IC 的集成度

集成度

集成电路元、器件的 IC 基片称为芯片(chip)。将一块芯片上所制成的电路元、器件数称为**集成度**。各个晶体管、电阻、电容等电路元、器件所占面积并不相同。集成度最方便的是像表 2.3 那样进行分类。例如，64Kbit 的动态存储器 DRAM 约由 1.6×10^5 个元、器件组成，并命名为 LSI。4Mbit 的 DRAM 约由 8×10^6 个元、器件组成，并命名为 VLSI。

表 2.3　由集成度进行的分类

IC	元器件数	IC	元器件数
SSI(Small Scale IC)	$\sim10^2$	VLSI(Very Large Scale IC)	$10^5\sim10^7$
MSI(Medium Scale IC)	$10^2\sim10^3$	ULSI(Ultra Large Scale IC)	$10^7\sim$
LSI(Large Scale IC)	$10^3\sim10^5$		

集成度和发热量

现在看一下集成度增加时，发热量是如何变化的。假定有一个在一块芯片上用 4 个元件制成的集成电路。如果元件的一边长度变为原长度的 1/2，那么这时这块芯片上可容纳的元件数就是原来的 4 倍。如果元件的一边长度是原来的 1/4，那么，这块芯片上的元件数就是原来的 16 倍。也就是说，元件的一边长度每减少 1/2，集成度就增加 4 倍(见图 2.57)。假定流过每个元件的电流 I 不变且电阻 R 也不变，于是每块芯片的发热量应是与芯片上的元件数成正比。因为半导体的工作温度有上限，所以，实际的集成电路如何减少元件的发热量就成为一个大问题。

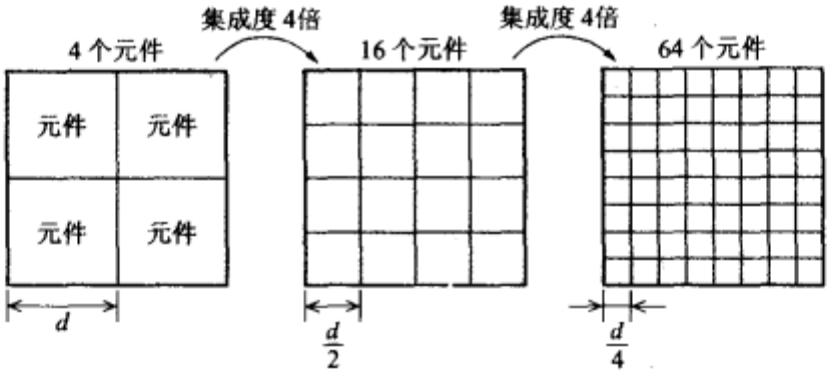


图 2.57 芯片的大小与集成度

双极型晶体管和 MOS FET 的比较

集成度
消耗功率
工作速度

如果将双极型晶体管和 MOS FET 的**集成度**、**消耗功率**和**工作速度**加以比较即可得到表 2.4。工作速度取决于载流子迁移率的大小。如果载流子迁移率大，那么，工作速度也高。所谓工作速度，是表示输出信号对输入信号响应的快慢。因为双极型晶体管比 FET 能让更多电流流过，所以工作速度快。

表 2.4 双极型和 MOS 型的比较

类型	集成度	消耗功率	工作速度
双极型 IC	小	大	大
MOS 型 IC	大	小	小

相关知识

◆ 关于 ASIC

通常把基本电路中利用率高的电路作为通用 IC 进行生产。通用 IC 以大多数非特定用户为对象。与此相反，将满足特定用途和按用户订货要求进行生产的 IC 称为 ASIC(Application Specific IC)。在 ASIC 中有一种被叫作 PLD(Programable Logic Device)的定制(custom)的 LSI。PLD 是把芯片上事先排列好的逻辑元件(逻辑积，逻辑和)再由用户自己配线来实现电路功能的。配线是用程序来表达逻辑公式，并在专用写入器上进行。

16　数字 IC 和模拟 IC

要　点

按照 IC 所处理信号的形态，IC 可分为数字型和模拟型的两类。数字型是利用晶体管的开关作用；模拟型是利用晶体管的放大作用。

解　释

数字 IC

数字(digital)信号的处理是由逻辑电路来进行的。可用晶体管和二极管组成逻辑电路，这是因为晶体管和二极管能以开关形式进行工作。所有的逻辑电路都可以用“非”门、“或”(逻辑和)门及“与”(逻辑积)门这三种基本电路组成。如果从构造角度来看，数字 IC 也可如表 2.5 那样分为双极型和 MOS 型两类。

表 2.5　数字 IC 的分类

双极型	DTL，TTL，ECL，I^2L 等逻辑元件
MOS 型	pMOS，nMOS，CMOS 组成的存储元件和逻辑元件

MOS 型中，特别是 CMOS(Complementary MOS)是由 pMOS 和 nMOS 组合成的逻辑元件。消耗功率极小，非常适合高集成化。

TTL

TTL(Transistor Transistor Logic)是经常使用的双极型逻辑元件，它以 DTL(Diode Transistor Logic)为原形。作为 TTL 电路的例子，图 2.58 给出了型号名为 SN7400 的数字 IC。

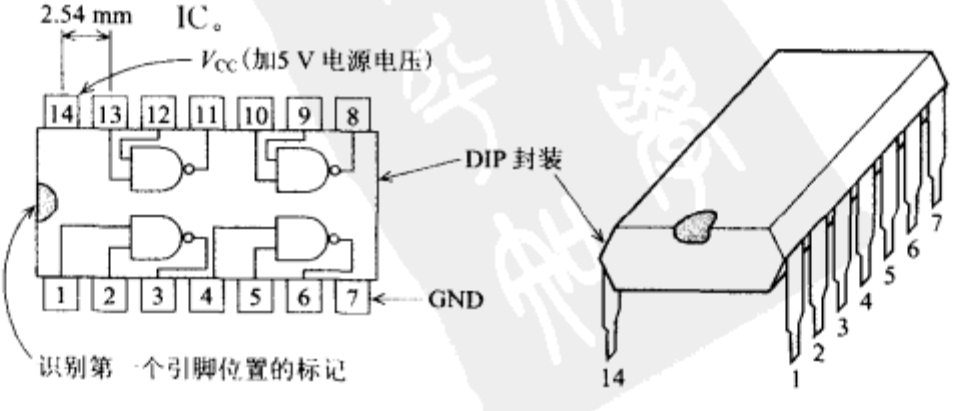


图 2.58　TTL 集成电路示例

模拟 IC

运算放大器
OP 放大器

模拟(analog)信号的处理是由晶体管的放大作用来进行的。作为放大器的集成电路来说，有以差动放大器为主体的**运算放大器**(Operational Amplifier，**OP 放大器**或运算放大器)。运算放大器是以理想放大器为目标进行设计的。理想放大器要满足以下四个条件：

① 放大系数无限大；

② 输入阻抗无限大；

③ 输出阻抗无限小；

④ 能够放大的频率范围无限大。

图 2.59 所示是运算放大器 μA741HC 的原型结构。型号的命名方法随厂家的不同而异。不过电路 741 是其他厂家后来生产的同种产品，几乎都与最初的相同。

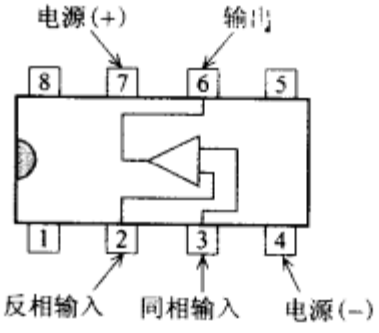


图 2.59　运算放大器例

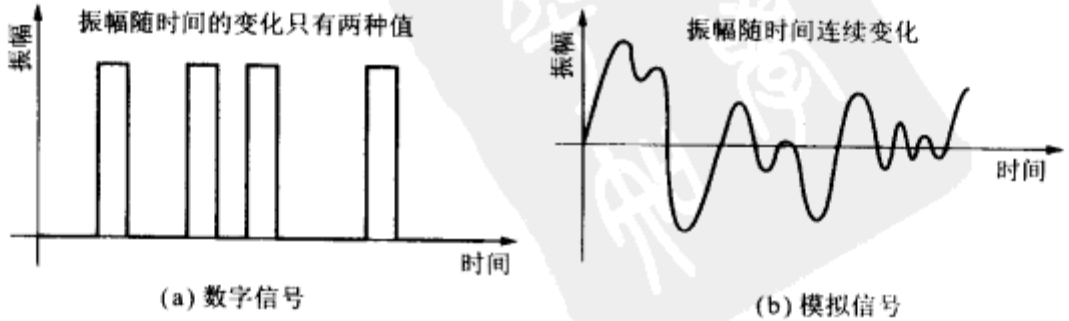
相关知识

◆ 原始型和后续型

将某厂家最初开发并公布的新产品称为原始型(original source)。将以原始型为基础，由其他厂家生产并公布的同等产品称为后续型(second source)。后续型中有引脚相同的和引脚不同的两种形式。

◆ 数字信号和模拟信号

数字信号和模拟信号的区别可见图 2.60 中(a)、(b)。



(a) 数字信号　　(b) 模拟信号

图 2.60　数字信号和模拟信号

17　存储元件

要　点

存储元件可以存储数字化的信息。RAM(Random Access Memory)可以写入与读出。ROM(Read Only Memory)仅能读出。

解　释

存储元件的结构和工作原理

存储元件是把存储单元按阵列集中起来构成的(见图 2.61)。一个存储单元仅能存储 1bit 的信息,以阵列形式配置的每个单元带有一个地址号,并可通过**译码器**(decoder)对其进行**寻址**(address)。

译码器
寻址

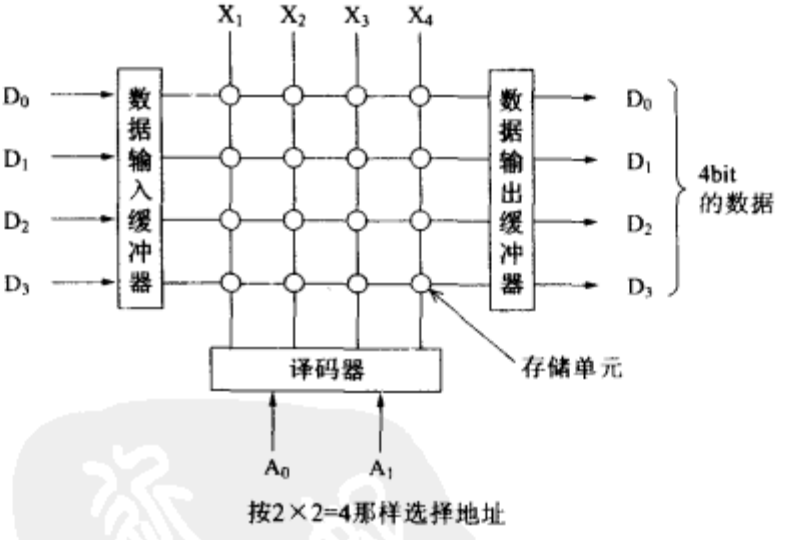


图 2.61　存储元件的基本结构

被选中的存储单元按来自中央处理器(CPU)的信号进行数据的写入或读出。CPU 向存储装置写入数据或从存储装置读出数据称为**存取**。将从 CPU 发出存取信号开始到读出存储数据为止的时间称为**存取时间**(access time)。

存取
存取时间

存储元件的分类

半导体存储元件也叫 **IC 存储器**。IC 存储器如果从功能上来区分,可分为三类。**RAM** 能够读出和写入数据;**ROM** 仅能读出。不过,在将其装入电路之前,可有条件地写

IC 存储器
RAM
ROM

入数据。为了写入要使用被称为 ROM 写入器(writer)的专用装置。无论是 RAM 或 ROM 只要指定一个地址,那么,不管是哪个地址,存取的时间都是相同的。SAM(Serial Access Memory)可按写入的顺序读取数据。

- IC 存储器
 - RAM
 - DRAM(Dynamic RAM)
 - SRAM(Static RAM)
 - ROM
 - 掩膜只读存储器(Masked ROM)(不能写入)
 - PROM(Programmable ROM)
 - EPROM(Erasable PROM)
 - EEPROM(Electrically Erasable PROM)
 - SAM—移位寄存器(Shift Register)

DRAM 的存储单元

作为存储元件例子,这里举出 DRAM。DRAM 的结构简单,而且一个存储单元能用一个 MOSFET 和一个电容组成。MOSFET 是用开关动作来对所选中的电容一会儿进行充电,一会儿放电(见图 2.62)。根据电容是否储存有电荷来决定 1bit 的信息。

储存在电容器里的电荷,会一点一点自然漏掉,因此,使用 DRAM 时,每次读出存储内容后都必须进行新的充电。将这一工作称为**刷新**(refresh)。刷新就是重新写入的意思。

刷新

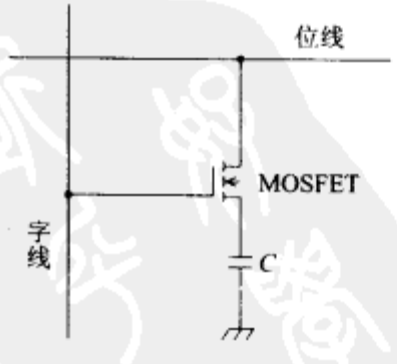


图 2.62 DRAM 的存储单元

18　半导体激光器

要　点

作为相干光发光元件有半导体激光器(laser)。半导体激光器是一个光的振荡电路。其振荡机理的关键是光的受激放大和由反射镜实现的正反馈。

解　释

半导体激光器的结构

半导体激光器

异质结

双异质结

激活区域

化合物半导体的砷化镓(GaAs)具有把过剩的能量以光的形式放出的特性。图 2.63 是作为光通信的光源而实用化的**半导体激光器**(或激光二极管)的原理结构。如图所示，它用 p 型和 n 型半导体夹住本征半导体 GaAs。p 型和 n 型是用 AlGaAs 制成。称这种种类不同的半导体之间的结为**异质**(hetero)**结**。如果有两个异质结就称**双异质结**。双异质结是为了把载流子复合时发出的光封入本征半导体区域内而进行开发的。因为在这个本征半导体中既发光又放大，故称此区域为**激活区域**。激活区域的两端，一端为镜面，另一端为可透过一部分光的半透半反射镜面。

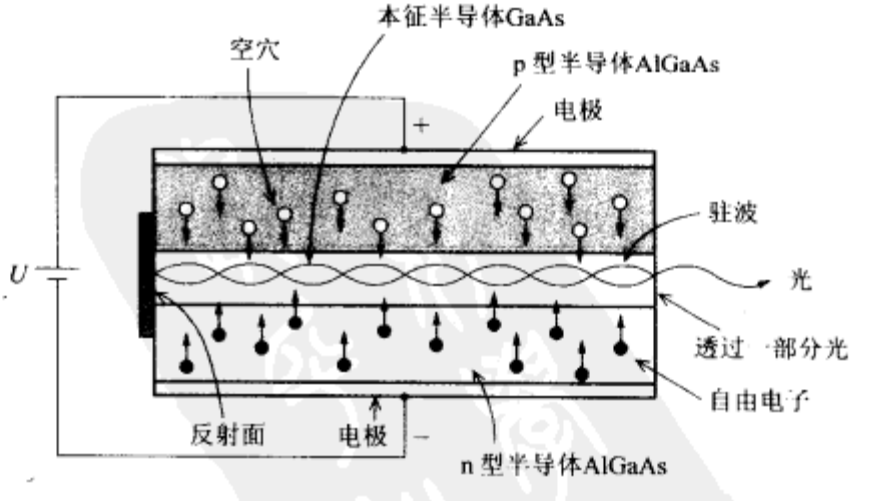


图 2.63　半导体激光器的结构

能带结构

如果在半导体激光器上加一正向偏压，那么，n 型半导体的费米能级比 p 型半导体相对上升了。其结果是自由电

子和空穴向激活区注入。注入的载流子在激活区内由于再复合而发光(见图 2.64),从而造成半导体激光器的双异质结处激活区的折射率比相邻的 p 型和 n 型区域的都大。因此,发出的光就在结面上形成全反射而被封入激活区内。在结面上的全反射与向水面斜向入射的光发生全反射是一样的,当然水的折射率比空气的大。

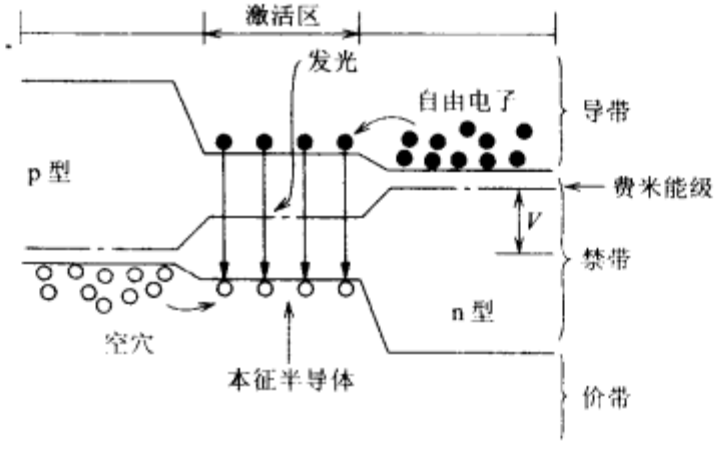


图 2.64　能带结构

受激发射

入射到激活区域的光由于镜面反射而往返于激活区中。这时,被行进的光所激发出的新光继续往返于激活区中。将这一发光机理称为**受激发射**。受激发的光是和激发光的相位相同,波长相同。因此,被放大的光在激活区中出现了共振现象,于是发生了相干光。

相关知识

◆ 相干光

相干(coherent)就是光的波长和相位呈现出某种一致性的状态(见图 2.65)。在半导体激光器中,多数原子发出的光,其波长和相位都具有一致性。广播和无线通信中所使用的电波,其波长和相位也具有此相一致的性质。与这种电波相当的光就是相干光(见图 2.66)。如果使用相干光,那它和电波一样也能把信息变为信号进行传送。因为光的波长比电波的波长短得多,所以能让每单位时间的信息量飞跃地增加。

不相干的光称为非相干光(incoherent)。太阳光和电灯光等普通的光是非

相干光。非相干光的发光元件有发光二极管。

光器件中除了 LED 外，还有 pin 光电二极管(pin photo diode)和雪崩光电二极管(avalanche photo diode)及光电晶体管(photo transistor)等光敏元件。

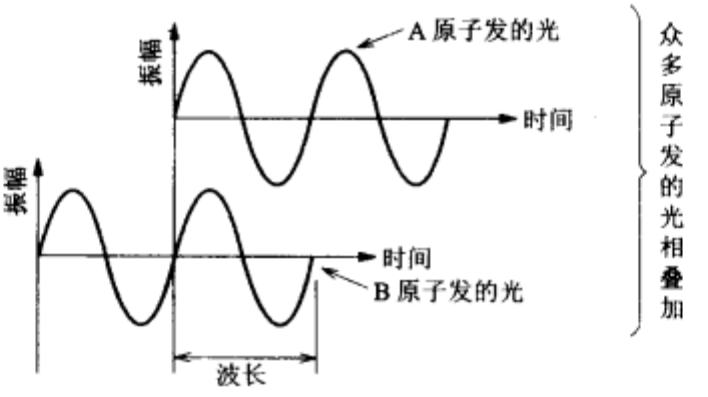


图 2.65　相干光的相位和波长

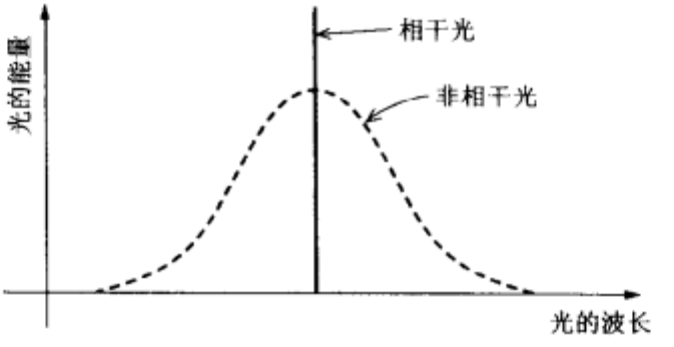


图 2.66　相干光的光谱

19 约瑟夫森元件

要点

超导是一种在绝对零度附近时电阻为零的现象。约瑟夫森元件就是利用超导现象的一种高速开关器件。

解释

超导现象

导体有电阻的原因是因为导体中有妨碍载流子移动的障碍。这个障碍中有晶格振动和晶格缺陷及杂质等。晶格振动就是构成晶格的原子的热振动。**晶格缺陷**就是构成晶格的原子在此部分缺少，从而破坏了晶格的规则性。杂质就是混入晶体中不同种类的原子。这些原子的障碍程度随温度而改变。一般来说，这些障碍程度在低温下是受晶格缺陷和离子化杂质的影响所支配。在高温下是受晶格振动的影响所支配。

晶格缺陷

因为晶格振动是原子的热振动，所以随温度下降而减弱。因此，在温度最低的绝对零度时，晶格缺陷和杂质都没有的导体，其电阻理论上为 0Ω。称这种现象为**超导**。称引起超导时的温度为**临界温度**。超导是在物质的某一固有温度下发生。临界温度比绝对零度高，这是源于电子具有波动性的关系。

超导

临界温度

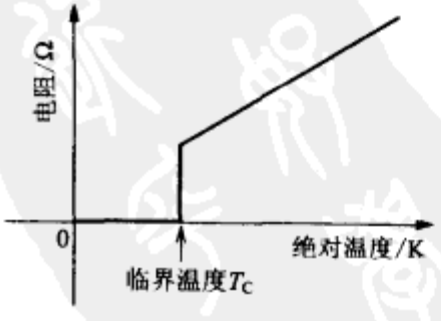


图 2.67 绝对零度附近的电阻

约瑟夫森元件的结构和特性

如果让两个处在超导状态的物体在电气上进行弱耦合(约瑟夫森(Josephson)结)，那么，即使其两端不加偏压也会有电流流过。称此现象为**约瑟夫森效应**。如图 2.68 所示那样，

约瑟夫森效应

如果将绝缘薄膜用超导体夹起来，这就成为电气上的弱耦合。

超导状态下，有当超导体上所加磁通量大于一定值时，它就回到常导状态的性质。如果用磁通量来转换超导体的超导状态和常导状态，那么，它就可以作为开关加以利用(见图 2.69)。称能完成上述工作的元件为**约瑟夫森元件**。这种开关的动作速度极快[约数微微秒(10^{-12}s)]。

约瑟夫森元件

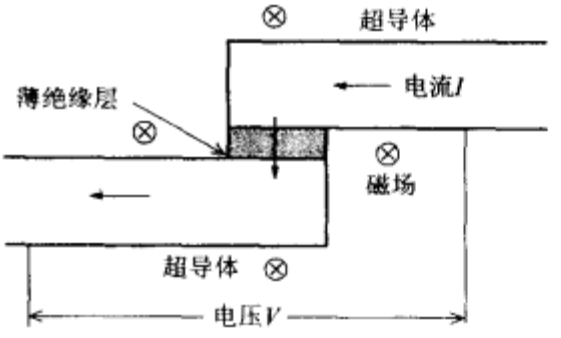


图 2.68　约瑟夫森元件的原理

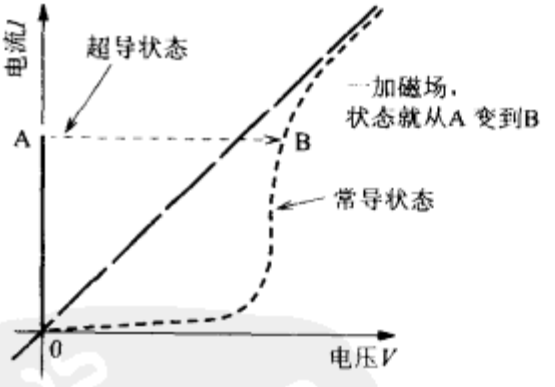


图 2.69　约瑟夫森元件的开关动作

相关知识

◆ 超导的临界值

超导现象中有温度、磁通量和电流密度大小的临界值。一旦超过这个临界值，状态就改变了。这里所说的状态是指超导状态和常导状态两种。所谓电流密度是流过每单位面积的电流。流过两根导线的电流即使相同，流过断面积小的导线，其电流密度大。临界温度随物质的不同有很大的不同。不同物质，它的临界温度也有在液态氮的沸点(77K)以上的。氧化物也发现有在 125K 下表现出超导现象的物质。

题外话

单晶体的培育与生长

培育硅单晶体的方法之一是切克劳斯基(Czochralski)单晶体生长法(简称CZ法或称拉单晶体法)(见图2.70)。单晶体是以晶核为种子生长起来的。为了培育单晶体,必须有种子单晶体。可是,最初的种子单晶体又从何处获得呢?当然最初的种子单晶体也可以是多晶体,多晶体是由小单晶体集合起来的。人们通常见到的冰就是由多晶体形成的。如果把水自然冷冻,就成为多晶体。如果将熔化的硅也自然降温,就成为多晶体。如果把多晶体作为种子让其生长,那么构成多晶体的小单晶体即会逐渐长大起来。长大的单晶体也可成为其他单晶体的种子。另外,将培育起来的单晶体棒称为坯料(ingot)。坯料一般被切成约0.5mm厚的薄片,将切成的薄片叫作单晶片(wafer),它是半导体元、器件的基片。

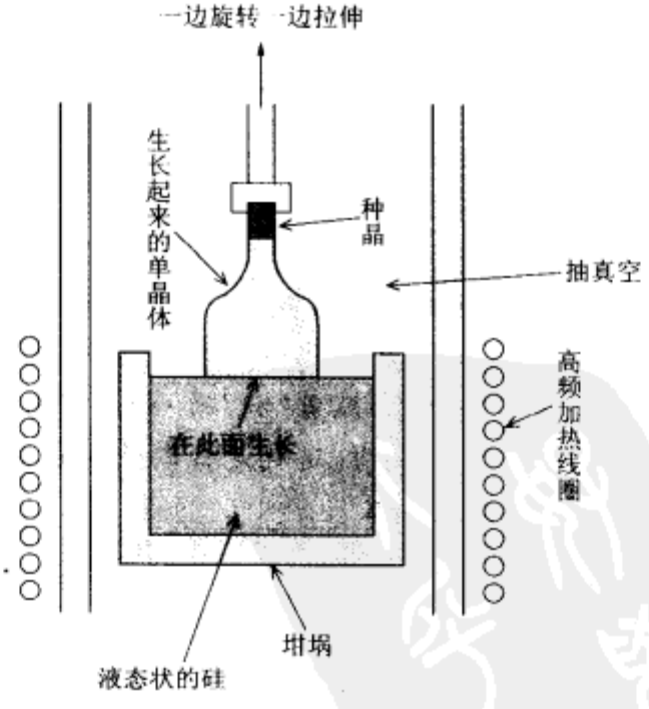


图 2.70 由拉伸法培育单晶体

巨大的磁铁是地球,那么最小的磁铁是什么

旅行中之所以能使用磁铁来判断南北方向,正是因为地球本身就是一块巨大的磁铁。而无论磁铁多么小,它总是N极与S极成对而不分离。

人们一般会问：如果得不到仅有N极或仅有S极的磁铁，那么极小的磁铁是什么？它到底能小到什么程度？这里的回答是：所有的物质都是由原子构成的，磁铁也应是小到原子的程度。

构成原子的是原子核和电子，电子在原子核的周围旋转（公转）。这里电子移动的反方向即是电流的方向，所以运用安培右手螺旋定则，即知产生有如图2.71所示的磁通量。可见，一个原子也就是一块小磁铁。

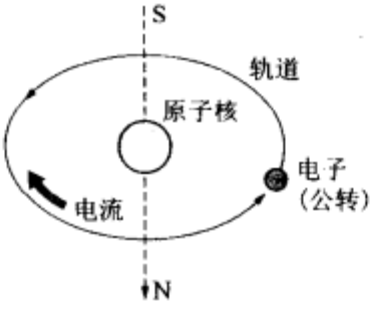


图2.71　原子也是小磁铁

日本最初点亮电灯的日子

1879年（明治11年）3月25日是日本中央电信局举行开业仪式的日子，其庆祝晚宴在东京虎门的东京工部大学校举办，晚宴上的一件大事即是点亮法国制的电弧灯。当时点亮这样的电灯，在欧美甚至要准备几个月，最终能点亮15min就已经是很大的成功。当晚，英国教官爱尔顿即打算用50多个高价电池来点亮电弧灯。在人们紧张等待的黑暗中，宴会场上突然明如白昼，顿时一片欢腾。过了一会儿，随着“嗞”的一声，人们又回到了黑暗的世界中。虽然仅仅如此，但人们记得，这就是日本最初点电灯的日子，为了纪念，日本将3月25日定为“电气日”。

第 3 章

模拟电子电路

● 责任编委
菅谷光雄
● 执　　笔
菅谷光雄(1～11)
宫本　修(12～22)

我们将在本章中学习放大电路、振荡电路、调制电路、解调电路及电源电路等模拟电子电路的基础知识。

放大电路将研究它的基本工作和特性，以及电路的特征与种类等；振荡电路将研究振荡原理，以及基本的LC振荡电路与CR振荡电路的工作原理。另外，还将研究谋求振荡频率稳定晶体振荡电路的工作原理及实例等。

调制电路是在发射端将音频信号变成便于天线高效率发射的电波而采用的电路。与此相对应，解调电路是在接收端从来自接收天线的电波中取出原来音频信号的电路。在这里我们将学习这些电路的原理和应用等。

电源电路将学习从基础的整流电路到实用电路的工作原理，并将进一步研究把直流功率逆变换成交流功率逆变器等的原理和应用实例。

1　放大的原理

要　点

放大原理就是用小输入信号来控制电源的能量，并使之变换成大的输出信号。晶体管能用小的基极电流控制大的集电极电流，把这个称为晶体管的放大作用。

解　释

h_{FE}和h_{fe}的关系

发射极接地直流电流放大系数

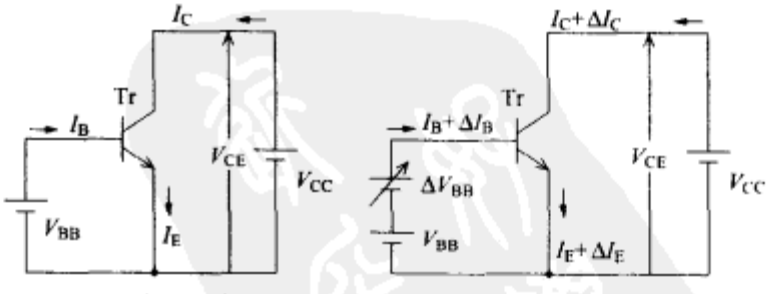
图3.1(a)所示的发射极接地电路中，设基极电流为I_B，集电极电流为I_C，那么**发射极接地直流电流放大系数**h_{FE}可用式(3.1)表示，即

$$h_{FE}=\frac{I_C}{I_B} \tag{3.1}$$

即I_B放大h_{FE}倍后成为I_C。如图3.1(b)所示电路，集电极和发射极之间的电压V_{CE}固定不变，而将基极上微小电压ΔV_{BB}串接到直流电源V_{BB}上，此时，基极电流将发生微小变化ΔI_B，集电极电流也随之发生微小变化ΔI_C。将这时的ΔI_C和ΔI_B之比称为**小信号电流放大系数**，它可用式(3.2)表示，即

小信号电流放大系数

$$h_{fe}=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \tag{3.2}$$



(a) 直流放大　　(b) 微小电流放大

图3.1　电流放大作用

I_B和I_C的关系如图3.2的I_B-I_C特性曲线所示，一般情况下，它不是直线。h_{FE}是表示曲线上某一点的I_C和I_B之比。h_{fe}则是表示I_C的微小变化部分对I_B的某一微小变化部分之比，所以通常h_{FE}和h_{fe}不是相同值。另外，也有将

h_{FE}表示为β的，β值一般为$10\sim10^3$。

相关知识

◆ 基极接地方式的直流电流放大系数

在如图3.3所示的基极接地电路中，因为晶体管的发射极电流I_E的极小一部分为基极电流I_B，余下部分为集电极电流I_C，所以，式(3.3)的关系成立，即

$$I_E = I_B + I_C \tag{3.3}$$

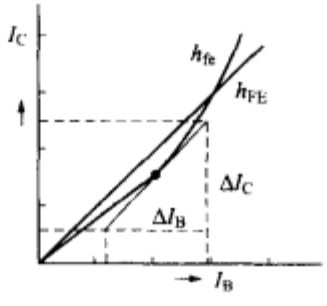


图3.2 I_B-I_C特性曲线

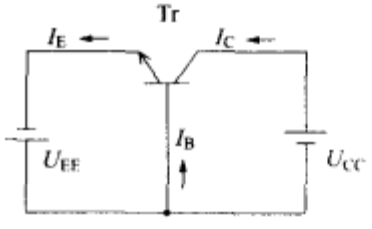


图3.3 基极接地电路

将这时的I_C和I_E之比称为基极接地直流电流放大系数，可用式(3.4)表示，即

$$h_{FB} = \frac{I_C}{I_E} \tag{3.4}$$

有时h_{FB}也用α表示，α值为0.9～0.999。

例题

试根据图3.4所示的V_{CE}-I_C特性曲线回答如下问题。

① 试求P点的发射极接地直流电流放大系数h_{FE}的值。

② 试求这时的基极接地直流电流放大系数h_{FB}的值。

③ 试求ab间的小信号电流放大系数h_{fe}的值。

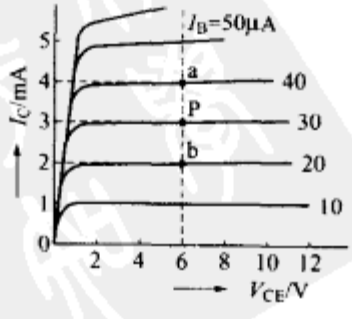


图3.4 V_{CE}-I_C特性曲线

答　① $h_{FE}=\dfrac{I_C}{I_B}=\dfrac{3\times10^{-3}}{30\times10^{-6}}=100$

② $h_{FB}=\dfrac{I_C}{I_E}=\dfrac{I_C}{I_B+I_C}=\dfrac{3\times10^{-3}}{30\times10^{-6}+3\times10^{-3}}\approx0.99$

另一种解：$h_{FB}=\dfrac{h_{FE}}{1+h_{FE}}=\dfrac{100}{1+100}\approx0.99$

③ $h_{fe}=\dfrac{\Delta I_C}{\Delta I_B}=\dfrac{(4.0-2.0)\times10^{-3}}{(40-20)\times10^{-6}}=100$

2 基本放大电路

要 点

如果在晶体管的基极加一交流输入电压(输入信号),那么就能从与集电极相连接的电阻两端取出交流输出电压(输出信号)。将这种电路称为基本放大电路。

解 释

输出电压的大小

在图 3.5 所示的发射极接地的基本放大电路中,输出电压的大小,能够由电阻值的加大来放大到比加到基极的交流输入电压更大的电压。这样一来,用连接到集电极上的电阻,也就能够将交流电压放大。因此,把连接的电阻称为**负载电阻**。

负载电阻

图 3.5 中,现假如交流输入电压 $v_i=0$,那么,负载电阻 R_L 两端的电压 V_o 可用式(3.5)表示,即

$$V_o=-I_C R_L \tag{3.5}$$

式(3.5)的负号是因为在图 3.5 所示的发射极接地放大电路中,输出电压相对于输入电压的方向是相反的。即如图中所示,输入与输出波形的相位相差 180°。

另外,集电极电压 V_{CE} 可用式(3.6)表示,即

$$V_{CE}=V_{CC}-I_C R_L \tag{3.6}$$

其次,在基本电路里,假如加在基极上的输入电压为 v_i,那么,负载电阻 R_L 两端的电压,如式(3.7)所示那样,是直流和交流的输出电压之和:

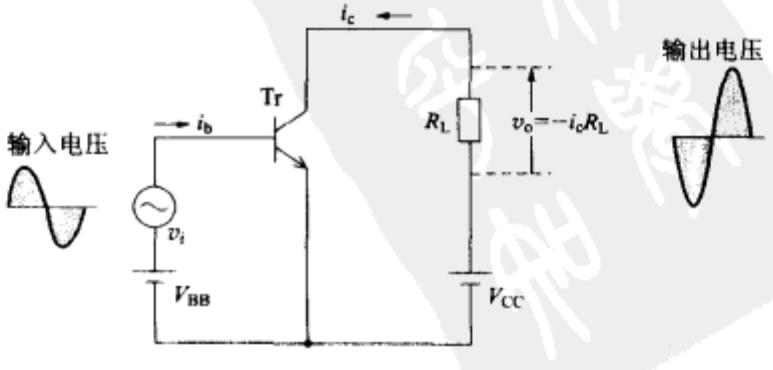


图 3.5 基本放大电路

$$V_o + v_o = -(I_C + i_c)R_L \tag{3.7}$$

因此，交流输出电压 v_o 可用式(3.8)表示，即

$$v_o = -i_c R_L \tag{3.8}$$

相关知识

◆ 负载电阻上所消耗的交流输出功率

在图 3.5 上，负载电阻 R_L 所消耗的交流输出功率可用式(3.9)表示，即

$$p_o = i_c{}^2 R_L = \frac{v_o{}^2}{R_L} = |v_o i_c| \tag{3.9}$$

而交流输入功率 p_i 可用式(3.10)表示，即

$$p_i = v_i i_b \tag{3.10}$$

可见，v_o 的大小可比 v_i 大，同时，i_c 也可比 i_b 增大，所以 $p_o > p_i$，故功率也能放大。

◆ 晶体管各部分的波形

如式(3.7)所示那样，晶体管各部分的电压和电流是直流和交流之和。图 3.6 给出了各部分的电压和电流的波形。输出电压与输入电压相位相反，相差 180°。

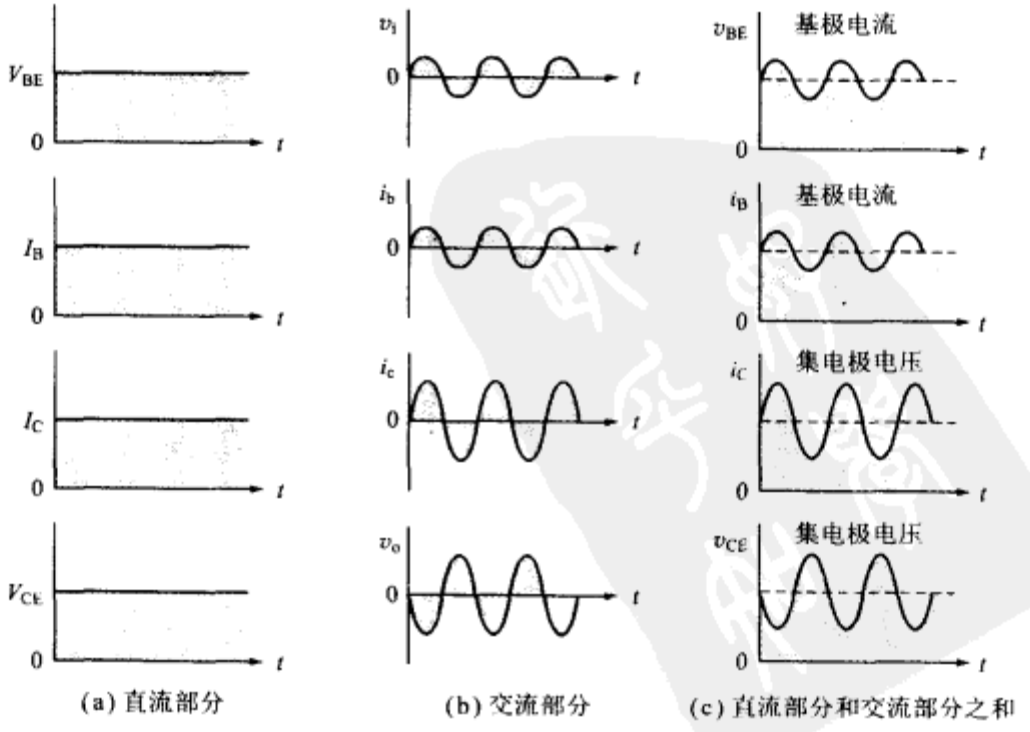


图 3.6　各部分的电压和电流的波形

3　放大电路的动态特性

要　点

晶体管是以直流部分为中心叠加交流部分进行工作的。把这个直流电压和直流电流中心值称为晶体管的偏置电压和偏置电流，简称为偏置值。将晶体管上接有负载时的特性称为动态特性。由负载电阻决定的负载线上的工作点处的直流电压值和电流值即是偏置值。

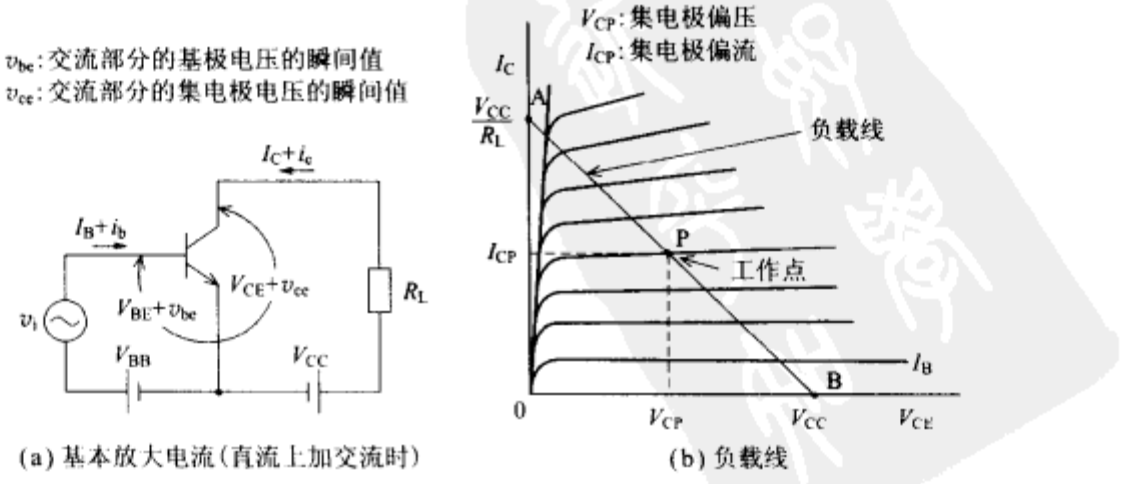
解　释

□ 负载线和工作点

为了让晶体管工作，偏置值是必需的。如果加的偏压适当，则输入信号不会失真且能放大，并能在负载上得到与输入信号相同形状的输出波形（正弦波）。在如图 3.7(a)所示的发射极接地的基本放大电路中，集电极电压 V_{CE} 可用式(3.11)表示，即

$$V_{CE}=V_{CC}-I_C R_L \tag{3.11}$$

如果将式(3.11)的关系描绘在图 3.7(b)所示的晶体管 V_{CE}-I_C 特性曲线上，那么，这就得连接图中 A 点和 B 点的直线。由式(3.11)，如令 $V_{CE}=0$，即图中 A 点，那么，$I_C=V_{CC}/R_L$；如果令 $I_C=0$，即图中 B 点，那么，$V_{CE}=V_{CC}$。因为这条直线AB的斜率是由负载电阻R_L决定，故称这条直



(a) 基本放大电流（直流上加交流时）　　(b) 负载线

图 3.7　放大电路的动态特性

负载线

线为**负载线**。

工作点

另外，在图 3.7(b)的负载线上由偏压决定的 P 点称为**工作点**。为了对振幅大的信号进行放大而且不失真，这个工作点应定在负载线的几乎中央的位置。如果像这样给出适当的偏压，那么，输出电压和输出电流的波形就会成为失真很小的正弦波。

相关知识

◆ 工作点的分类和特征

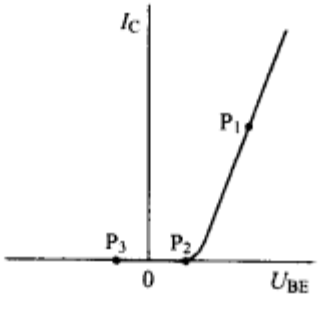


图 3.8　根据工作点的分类

在像图 3.8 所示那样的特性曲线上，工作点可分为三类。

① A 类工作点(P_1 点)：波形失真很小，它适合小信号放大。

② B 类工作点(P_2 点)：功率损耗很小，电源效率高。常用在 B 类推挽功率放大电路上。

③ C 类工作点(P_3 点)：波形失真大，不过电源效率高。常用在高频功率放大电路上。

例　题

在基本放大电路中，把电源电压 $V_{CC}=12V$、负载电阻 $R_L=3k\Omega$ 时的负载线描绘在图 3.9 所示那样的 V_{CE}-I_C 特性曲线上，并在把负载线中央定为工作点时，试求工作点处 V_{CE} 和 I_C 及 I_B 的值。另外，再求出输入正弦波电流振幅 $i_b=10\mu A$ 时的输出电流的振幅 i_c 为多少。

答　为了求负载线，连接特性曲线上 $V_{CE}=0$，$I_C=V_{CC}/R_L=12\div(3\times10^3)=4mA$ 的 A 点和 $I_C=0$，$V_{CE}=V_{CC}=12V$ 的 B 点。因为工作点选择这条负载线 AB 的中央，所以从图就可得到 $V_{CE}=6V$，$I_C=2.0mA$ 以及 $I_B=20\mu A$。另外，基极电流 i_b 如图所示，它以 $20\mu A$ 为中心，在 $\pm10\mu A$ 之间变化，所以，集电极电流 i_c 在负载线上的 P_1 和 P_2 之间变化，变化量为 $\pm1.0mA$。由此得输出电流的振幅为 1.0mA。

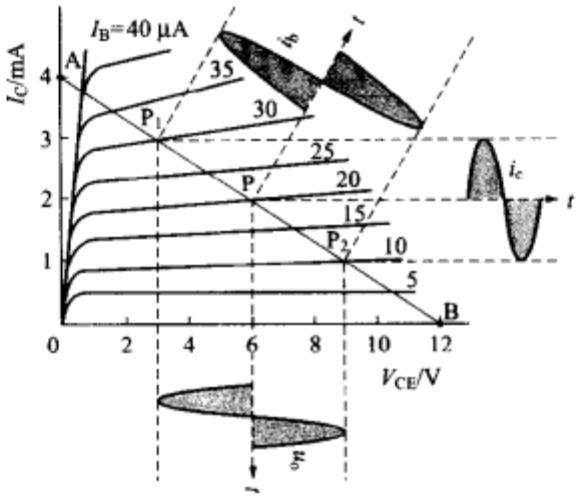


图 3.9　负载线和工作点

4　偏压电路(Ⅰ)

要　点

晶体管的工作点会随温度变化和电源电压的变化而移动。工作点一移动，往往会发生输出波形失真、热失控(晶体管的温度连续上升)等现象，严重时，还会超过最大额定值，造成晶体管损坏。因此，偏压电路的设计必须使放大电路的工作点稳定。

解　释

□ 偏压电路

偏压电路有双电源方式和单电源方式两种。将图 3.10 所示那样的偏压电路称为双电源方式。这种偏压方法用了基极直流电源 V_{BB} 和集电极直流电源两个电源，它和基本放大器不同的地方是在基极直流电源上串联着电阻 R_B，因此，这种偏压方法能将基极电流 I_B 调整到适当值。

与此相对应，将图 3.11 所示的偏压电路称为单电源方式，这种方式是共用一个集电极直流电源 V_{CC}。

耦合电容

另外，图 3.10 及图 3.11 电路中的电容 C 称为**耦合电容**，它起隔离直流成分而仅让交流成分流过的作用。

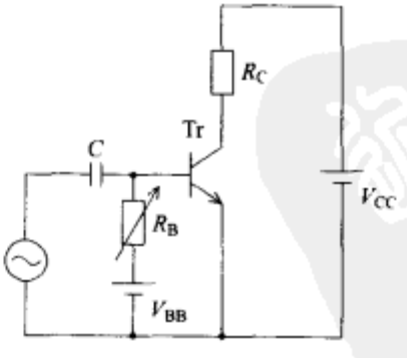


图 3.10　双电源方式

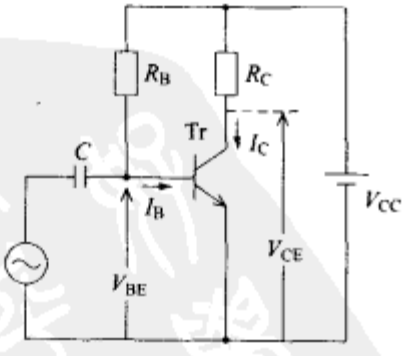


图 3.11　单电源方式

相关知识

◆ 固定偏压电路

图 3.11 所示的电路是采取由电源电压 V_{CC} 和偏压电阻 R_B 产生基极电流

I_B 的方法。如果集电极直流电源 V_{CC} 给定，则基极电流 I_B 几乎不变，所以一般称其为固定偏压电路。基极电流 I_B 可用式(3.12)表示，即

$$I_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B}\approx\frac{V_{CC}}{R_B} \tag{3.12}$$

晶体管基极和发射极之间的电压 V_{BE}，硅晶体管时约是 0.6V，锗晶体管时约是 0.2V。

图 3.11 所示的固定偏压电路的工作状况如下：

① 输入信号为 0 时→偏置电流 I_B 从电源 V_{CC} 经电阻 R_B 流入晶体管 Tr 的基极；

② 输入信号为正半周时→①之偏置电流与输入信号电流同方向，因而基极电流增加；

③ 输入信号为负半周时→①之偏置电流与输入信号电流反方向，因而基极电流减小。

另外，无信号输入时集电极电流 I_C 可用式(3.13)表示：

$$I_C=h_{FE}I_B=h_{FE}\times\frac{V_{CC}-V_{BE}}{R_B} \tag{3.13}$$

由此式可见，这种电路存在 I_C 变化随 V_{BE} 变化较小而随 h_{FE} 变化较大的缺点。为了减小输出失真，集电极电流 I_C 应选得使晶体管集电极和发射极之间的电压 V_{CE} 约等于电源电压 V_{CC} 的 1/2。

式(3.12)和式(3.13)这种无输入信号时流经晶体管各部分的电流，即称之为偏置电流。

例 题

试求图 3.12 所示那样的固定偏压电路中，当 $V_{CC}=12V$，$I_C=4mA$ 时的 R_B 大小。这里假定 $h_{FE}=200$，$V_{BE}=0.6V$。

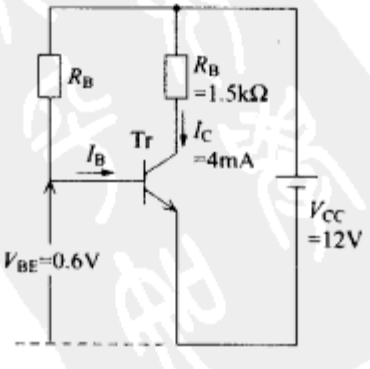


图 3.12 固定偏压电路

答 首先，基极电流 I_B 为

$$I_B=\frac{I_C}{h_{FE}}=\frac{4\times10^{-3}}{200}=0.000\,02(A)$$
$$=20(\mu A)$$

因此，偏压电阻 R_B 可依据式(3.13)求得为

$$R_B=\frac{V_{CC}-V_{BE}}{I_B}=\frac{12-0.6}{20\times10^{-6}}=570(k\Omega)$$

5　偏压电路(Ⅱ)

要　点

偏压电路的稳定度，不仅对温度变化有要求，而且对晶体管的特性的分散性也有要求。特别是晶体管的 h_{FE}，即使同一种产品，其 h_{FE} 大小的差别也在 2 倍左右。因此，稳定度不好的电路中就有因为 h_{FE} 的分散而使得工作点偏离设计值的。对此加以改善的电路有自偏压电路和电流反馈偏压电路。

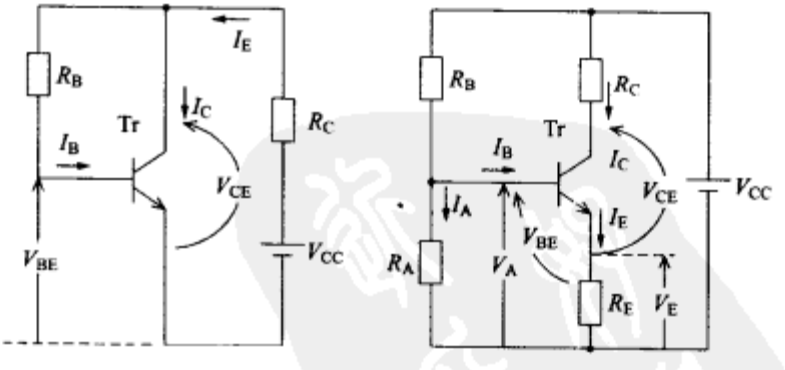
解　释

自偏压电路和电流反馈偏压电路

在固定偏压电路里，如果 h_{FE} 的分散达到 2 倍，集电极电流的变化也就达到 2 倍，所以，偏压稳定度不好。为了在 h_{FE} 有分散情况下得到好的稳定度，希望当 I_C 增大时，电路能自动地使 I_B 减小。

自偏压电路
电压反馈偏压电路

图 3.13(a)所示那样的**自偏压电路**(亦称**电压反馈偏压电路**)中，基极电流 I_B 是因集电极电压 V_{CE} 经过 R_B 流进基极的。



(a) 自偏压电路　　(b) 电流反馈偏压电路

图 3.13　偏压电路

基极电流 I_B 可用式(3.14)表示，即

$$I_B=\frac{V_{CE}-V_{BE}}{R_B}=\frac{V_{CC}-I_CR_C-V_{BE}}{R_B} \tag{3.14}$$

在式(3.14)中，如果 I_C 增大，则 R_C 上的压降 I_CR_C 增大，V_{CE} 减小，I_B 就自动减少。而根据 $I_C=h_{FE}I_B$ 的关系可

知,此阻止了 I_C 的增加。

这个电路与固定偏压电路相比,稳定度变好。可是,输入阻抗和增益下降是它的缺点。

电流反馈偏压电路
分压电阻
发射极电阻

图 3.13(b)所示那样的**电流反馈偏压电路**,因为偏压的稳定度最好,所以,一般情况下,多使用这种电路。**分压电阻** R_A 和 R_B 从电源电压 V_{CC} 取得分压电压,**发射极电阻** R_E 的作用是稳定偏压。

图 3.13(b)中的 U_{BE} 可用式(3.15)表示,即

$$V_{BE}=V_A-V_E=V_A-I_ER_E=V_A-(I_B+I_C)R_E \tag{3.15}$$

在式(3.15)中,当 I_C 增加时,I_ER_E 也增加,从而使 V_{BE} 减少。于是 I_B 减少,其结果是,I_C 的增加受到抑制。越加大 V_E,稳定度会越变好。可是,一般来说,V_E 是按 V_{CC} 的 10%左右进行设计的。由于这个电路中 R_A 和 R_B 也是与输入并联,所以,输入阻抗较低。另外,由于 R_A 上总有分压电流流过,因此其功耗也比其他偏压电路要大。

相关知识

◆ 温度补偿电路

在电流反馈偏压电路中,如果 R_E 过大,集电极和发射极之间的电压 V_{CE} 就减小,因此得不到大的信号输出。为了在 R_E 小的情况下提高稳定度,可在 R_A 上并联一个阻值随温度上升而变小的热敏元件来对温度变化进行补偿。

例 题

在图 3.13(b)中,当 $V_{CE}=12V$,$I_C=1mA$,$h_{FE}=180$ 时求 R_E、R_A、R_B。这里设 $V_E=1.2V$,$I_A=20I_B$,$V_{BE}=0.6V$。

答 设 $I_E\approx I_C$,得

$$R_E=V_E/I_E=1.2\div(1\times10^{-3})=1.2(k\Omega)$$

基极电流为

$$I_B=I_C/h_{FE}\approx(1\times10^{-3})\div180\approx5.6(\mu A)$$

故得

$$I_A=20I_B=20\times5.6\times10^{-6}=0.112(mA)$$

$$R_A = V_B / I_A = (V_{BE} + V_E) / I_A = (0.6 + 1.2) \div (0.112 \times 10^{-3})$$
$$\approx 16(\text{k}\Omega)$$
$$R_B = (V_{CC} - V_B) / (I_A + I_B)$$
$$= (12 - 1.8) \div (0.112 \times 10^{-3} + 0.0056 \times 10^{-3})$$
$$\approx 87(\text{k}\Omega)$$

应用知识

偏置电流与偏置电压

偏置电流和偏置电压是决定晶体管的工作中心点的，但不需要进行非常精确的设计。在电流反馈偏压电路中，基极电流非常小，即使假定 $I_B \approx 0$，求得的偏压和偏流的误差也在百分之几以内，实用中已经足够了。

6 h 参数和等效电路

要 点

放大电路可用有两个输入端和两个输出端的四端网络来表示。将这时的输出电压和输入电压之比的绝对值称为电压放大系数。将输出电流与输入电流之比的绝对值称为电流放大系数。另外，将输出功率和输入功率之比称为功率放大系数。

解 释

h 参数和等效电路

电压放大系数和电流放大系数可从对应的交流电路求得。如果把晶体管部分置换成容易计算的元件，放大系数等的求取就方便多了。把能与晶体管置换而又具有相同作用的另外的电路称为晶体管的等效电路。等效电路可以用 h 参数表示。

在图 3.14 所示的四端网络中，假定输入、输出电压与电流的最大值分别为 V_{im}、I_{im}、V_{om}、I_{om}，那么，电压放大率 A_v、电流放大率 A_i 及功率放大率 A_p 可用式(3.16)表示，即

$$A_v=\frac{V_{om}}{V_{im}} \quad A_i=\frac{I_{om}}{I_{im}}$$

$$A_p=\frac{P_o}{P_i}=\frac{\frac{1}{2}\times V_{om}I_{om}}{\frac{1}{2}\times V_{im}I_{im}}=\frac{V_{om}I_{om}}{V_{im}I_{im}} \tag{3.16}$$



图 3.14 四端网络

其次，在如图 3.15(a)所示的发射极接地的晶体管电路里，可从各电压与电流的变化量，如式(3.17)那样来定义 **h 参数(h 常数)**。

h 参数(h 常数)

$$h_{fe}=\frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}\quad(V_{CE}\text{为定值})$$

$$h_{ie}=\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta I_B}\ (\Omega)\quad(V_{CE}\text{为定值})$$

$$h_{oe}=\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}}\ (\mathrm{S})\quad(I_B\text{为定值})\qquad(3.17)$$

$$h_{re}=\frac{\Delta V_{BE}}{\Delta V_{CE}}\quad(I_B\text{为定值})$$

小信号电流放大系数

输入阻抗

输出导纳

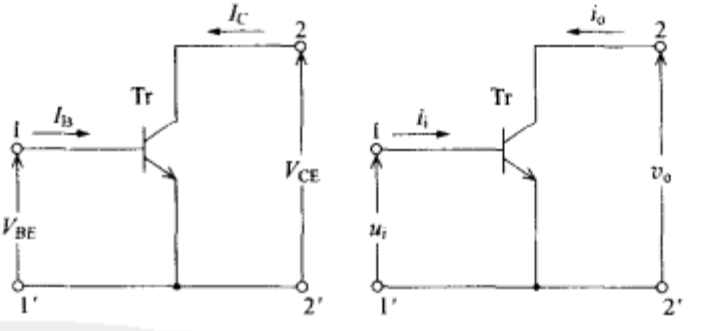
电压反馈系数

在式(3.17)中，h_{fe}为**小信号电流放大系数**，h_{ie}为**输入阻抗**，h_{oe}为**输出导纳**，h_{re}为**电压反馈系数**。

如果采用h参数来表示图3.15(b)所示的晶体管交流工作的电压和电流关系，即有

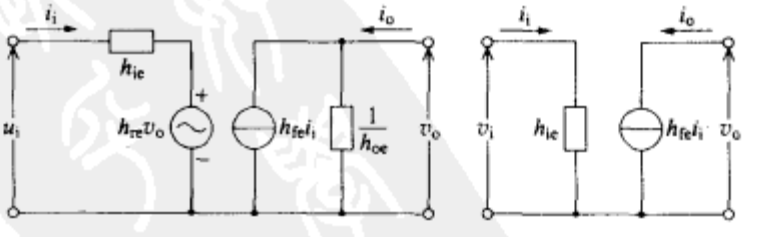
$$V_i=h_{ie}i_i+h_{re}V_o,\quad i_o=h_{fe}i_i+h_{oe}V_o\qquad(3.18)$$

从式(3.18)可得到如图3.16(a)所示那样的晶体管的等效电路。



(a) 直流工作的电压与电流　　(b) 交流工作的电压与电流

图3.15　晶体管电路



(a) 晶体管的等效电流　　(b) 简化的等效电流

图3.16　由h参数构成的等效电路

这里，$h_{re}v_o$表示电压源的电压，$h_{fe}i_i$表示电流源的电流。$1/h_{oe}$意味着输出阻抗。

一般情况下，h_{re}非常小，$1/h_{oe}$比负载电阻大得多，所以，

当忽略这两个参数时，就能够采用图 3.16(b)所示的简化等效电路。

图 3.17(a)所示基本放大电路的简化等效电路为图 3.17(b)。如果用这个等效电路求各放大系数和输出阻抗，那么，其结果如式(3.19)所示。

电流放大系数

$$A_i = \left| \frac{i_o}{i_i} \right| = \frac{h_{fe} i_i}{i_i} = h_{fe}$$

电压放大系数

$$A_v = \left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \frac{i_o R_L}{v_i} = \frac{h_{fe} i_i R_L}{h_{ie} i_i} = \frac{h_{fe} R_L}{h_{ie}}$$

功率放大系数

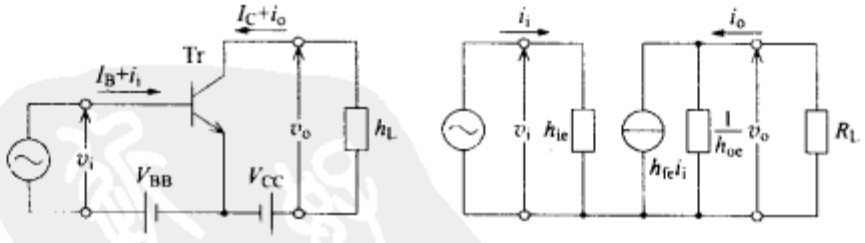
$$A_p = \frac{P_o}{P_i} = \frac{i_o^2 R_L}{i_i^2 h_{ie}} = \frac{h_{fe}^2 R_L}{h_{ie}} = A_v A_i \qquad (3.19)$$

输入阻抗

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = h_{ie}\ (\Omega)$$

输出阻抗

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}}\ (\Omega)$$



(a) 基本放大电路　　(b) 等效电路

图 3.17　放大电路和等效电路

相关知识

◆ 放大系数和增益

将用常用对数表示电路的输出功率和输入功率之比的单位称为贝尔(B)，为贝尔的 1/10 为分贝(dB)。

电压、电流和功率的放大率的大小，用叫作分贝的单位来表示，并将各放大

率的大小称为增益，其式如下：

$$\begin{aligned} &\text{电压增益} \quad G_v = 20\ \lg A_v(\text{dB}) \\ &\text{电流增益} \quad G_i = 20\ \lg A_i(\text{dB}) \\ &\text{功率增益} \quad G_p = 10\ \lg A_p(\text{dB}) \end{aligned} \tag{3.20}$$

假定各放大电路的放大倍数为 A_1、A_2、A_3，而各增益为 G_1、G_2、G_3，那么，从式(3.20)可知多级放大电路的总放大倍数 A_o 和总增益 G_o 可用式(3.21)表示，即

$$A_o = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3, \quad G_o = G_1 + G_2 + G_3(\text{dB}) \tag{3.21}$$

例　题

在图 3.18(a)所示的发射极接地的基本放大电路中，晶体管 2SC 1815 的 h 参数值为 $h_{ie}=4.5\text{k}\Omega$、$h_{fe}=180$、$h_{oe}=11.0\mu\text{S}$、$h_{re}=7\times10^{-7}$。

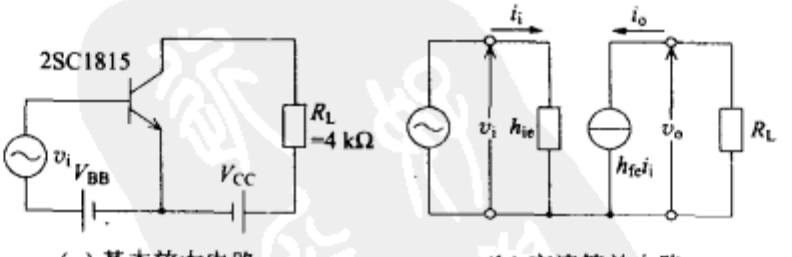
试求负载电阻 R_L 为 4kΩ 时的各放大倍数和各增益。同时再求出输入、输出阻抗。

这里，因为 h_{re} 值非常小，$1/h_{oe}$ 值比 R_L 大得多，所以当忽略这些时，其等效电路就是图 3.18(b)。

答　从图 3.18(b)所示的交流等效电路求各放大倍数和各增益，即可得到如下各值：

电流放大倍数

$$A_i = h_{fe} = 180$$



(a) 基本放大电路　　(b) 交流等效电路

图 3.18　放大电路的工作

电流增益

$$G_i = 20\ \lg A_i = 20\ \lg 180 \approx 20\times 2.26 \approx 45(\text{dB})$$

电压放大倍数

$$A_v = \frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}} = \frac{180\times 4\times 10^3}{4.5\times 10^3} \approx 160$$

电压增益

$$G_v = 20\ \lg A_v = 20\ \lg 160 \approx 20 \times 2.20 \approx 44(\text{dB})$$

功率放大倍数

$$A_p = A_v \cdot A_i = 160 \times 180 \approx 28\ 800$$

功率增益

$$G_p = 10\ \lg A_p = 10\ \lg\ 28\ 800 \approx 10 \times 4.46 \approx 45(\text{dB})$$

输入阻抗

$$R_i = h_{ie} = 4.5(\text{k}\Omega)$$

输出阻抗

$$R_o = \frac{1}{h_{oe}} = \frac{1}{11.0 \times 10^{-6}} \approx 91\ (\text{k}\Omega)$$

应用知识

对数计算

为了进行增益计算，用对数表和dB表也就可以了。对数计算如用函数台式计算机计算，则很方便。可是，如果能记住如下典型值，那么，利用对数的性质，就可以简化对数值的求取。

记住：$\lg 2 \approx 0.3$　$\lg 3 \approx 0.48$　$\lg 5 \approx 0.7$　$\lg 7 \approx 0.85$

例如：$\lg 3500 = \lg(5 \times 7 \times 10^2)$

$= \lg 5 + \lg 7 + \lg 10^2$

$= \approx 0.7 + 0.85 + 2 = 3.55$

7　小信号放大电路

要　点

用于放大比偏压和偏流幅度小的信号的电路称为小信号放大电路。因为用一个晶体管不能得到很大的增益，所以一般采用多级放大电路。在这种多级放大电路中，级间用电容器 C 和电阻器 R 进行耦合的，称其为 RC 耦合放大电路。而用变压器进行耦合的则称其为变压器耦合放大电路。

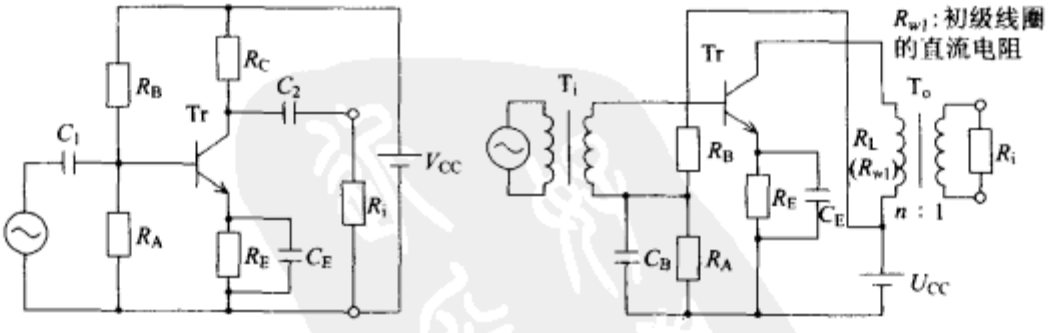
解　释

小信号放大电路

图 3.19(a)是 RC 耦合多级放大电路中的 1 级电路。图 3.19(b)是变压器耦合放大电路。

耦合电容器
旁路电容器

图 3.19(a)的 RC 耦合放大电路和基本放大电路不同的地方是接入了**耦合电容器** C_1、C_2（起阻止直流的作用）和**旁路电容器** C_E（起只让交流部分通过的作用）。另外，R_i 表示下一级电路的输入阻抗。RC 耦合放大电路，如果是多级连接进行放大，这时有由于输入阻抗不匹配而造成每一级的功率增益下降的缺点。不过，与变压器耦合放大电路相比，因为频率特性的频带宽，所以一般情况下常被采用。



(a) RC 耦合放大电路　　(b) 变压器耦合放大电路

图 3.19　小信号放大电路

这个电路中，晶体管的直流负载电阻是 $R_C + R_E$，交流负载电阻可用下式表示：

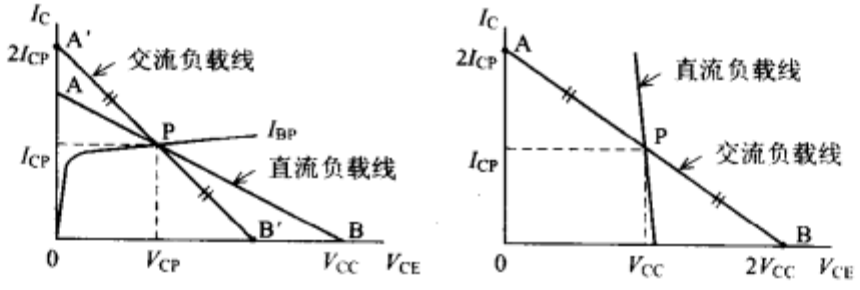
$$R_L = \frac{R_C R_i}{R_C + R_i}$$

图 3.19(b)所示的变压器耦合放大电路，因为采用变压器，所以，可得到阻抗的匹配，且直流电流不流过负载。因此，可以有效地利用电源电压，并能用低的电源电压得到大的输出功率。

相关知识

◆ *RC* 耦合和变压器耦合的动态特性

图 3.20(a)是 *RC* 耦合放大电路的动态特性，而图 3.20(b)是变压器耦合放大电路的动态特性。



(a) *RC* 耦合放大电路　　(b) 变压器耦合放大电路

图 3.20　动态特性

图 3.20(a)所示的工作点 P 可按如下方法求得：在特性曲线上按直流负载画一条直流负载线 AB，然后再按交流负载画一条交流负载线 A′B′，两线的交点即为工作点，一般情况下，工作点应在交流负载的 2 等分点上。其次，变压器耦合放大电路的直流负载是 R_E+R_{w1}，交流负载是 $R_L=n^2R_i$。因为 $R_E+R_{w1}\ll R_L$，所以，如同图 3.20(b)所示，工作点几乎处在电源电压 V_{CC} 的垂直线上。

◆ 频率特性

RC 耦合放大电路的频率特性与变压器耦合放大电路相比，虽然中频增益小，可是，带宽较宽。通常将增益比中频段增益低 3dB 的频率 f_{CL}、f_{CH} 分别称为低频截止频率和高频截止频率。将 $f_{CH}-f_{CL}=B$ 称为带宽。频率低于或高于截止频率，增益都会下降。

在 *RC* 耦合放大电路里，低频增益下降的原因是由于受到耦合电容和旁路电容的影响，而高频增益下降的原因是由于受到 h_{fe} 的减小和集电极与发射极之间的输出电容以及配线间的分布电容等的影响。而在变压器耦合放大电路里，如果频率降低，变压器阻抗就减小，于是增益下降。如果频率增高，变压器绕线间的分布电容的影响就变大，增益也会下降。

8　负反馈放大电路

要　点

一般的放大电路常有波形失真和噪声及增益随温度变化等问题。为此，常将放大器输出的一部分按照使输入电压减小的方向（即反馈电压和输入电压反向）反馈回输入端，从而改善放大器输出特性，称这类放大电路为负反馈放大电路。

解　释

负反馈放大电路的原理

负反馈的优点：① 能改善放大电路增益的稳定性，使之不受温度和电源电压变化的影响；②可减少放大电路内部的失真和噪声；③加宽了频率特性的带宽等。但也有增益下降和改变了输入、输出阻抗的缺点。

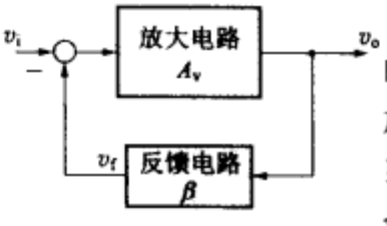


图 3.21　负反馈放大电路的原理

图 3.21 是负反馈放大电路的原理。A_v 是不加负反馈时的放大倍数，β 是反馈电路的**反馈系数**（反馈电压 v_f 和输出电压 v_o 之比，即 $\beta=v_f/v_o$）。

反馈系数

首先，不加负反馈时的输出电压 v_o 可用式(3.22)表示，即

$$v_o=A_v v_i \tag{3.22}$$

其次，加了负反馈时的输出电压 v_o 可用式(3.23)表示，即

$$v_o=A_v(v_i-v_f)=A_v(v_i-\beta v_o) \tag{3.23}$$

因此，负反馈放大电路的电压放大倍数可表示为

$$A_{vf}=\frac{v_o}{v_i}=\frac{A_v}{1+A_v\beta} \tag{3.24}$$

环路增益

称式(3.24)中的 $A_v\beta$ 为**环路增益**。如果增大环路增益，当 $A_v\beta\gg1$ 时，A_{vf} 就只取决于 β，如式(3.25)所示，即

$$A_{vf}=\frac{A_v}{1+A_v\beta}\approx\frac{A_v}{A_v\beta}=\frac{1}{\beta} \tag{3.25}$$

也就是说，A_{vf} 变得与没有负反馈时的放大倍数 A_v 没有关系。所以，A_{vf} 就不受放大电路中晶体管和电路元件的老化

或特性变化的影响。总的增益只由反馈电路的特性决定。如果在反馈电路里采用电阻元件，那么，能够改善频率特性。

相关知识

◆ 电流反馈电路和电压反馈电路

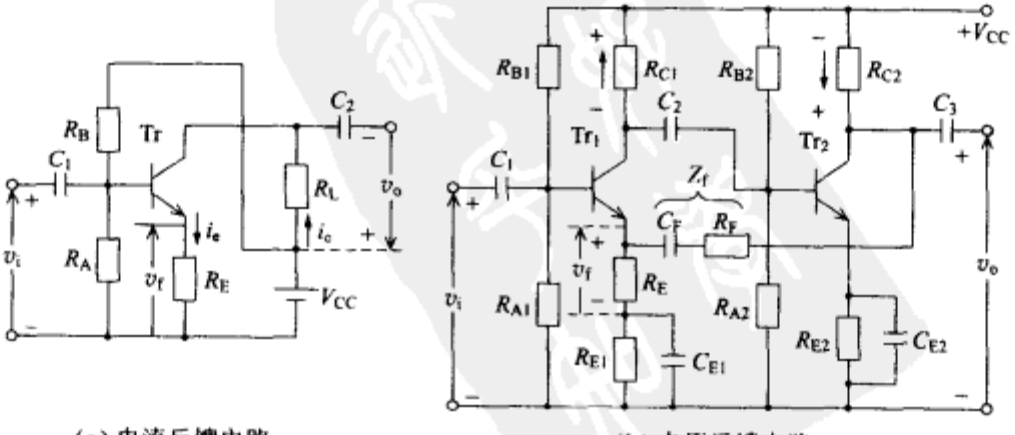
负反馈的方式根据从输出端取出反馈电压时是串联还是并联，和把反馈电压加到输入端上时是串联还是并联，在原理上共有四种。

图 3.22(a)是电流反馈电路(串联反馈串联加入形电路)。图 3.22(b)是电压反馈电路(并联反馈串联加入形电路)。

图 3.22(a)所示的电路可以认为是将偏压电路里使用的电容器去掉的电路。

当输入信号向正方向增大时，反馈电阻 R_E 上流过图示方向电流 i_e，该电流在 R_E 上的电压与输入电压相位相反，它使发射极和基极之间的电压减小，其效果是使输入信号变小，这就是说，加了负反馈后放大倍数变小了。称这种反馈电压 $v_f = R_E i_e$ 和流过负载 R_L 的交流电流 i_c 成正比的反馈为电流反馈。

图 3.22(b)所示的电路是在两级放大电路里通过反馈阻抗 Z_f 将输出电压的一部分以负反馈形式加到输入端的例子。如果 Tr_1 的输入电压正向增加，那么，在 Tr_1 的集电极负载 R_{C1} 上就产生如图所示方向的电压降，Tr_2 的输入电流就向着负方向减少。因此，在 Tr_2 的集电极负载 R_{C2} 上就产生了图示极性的电压。该电压的一部分通过由 R_F 和 C_F 所构成的反馈电路反馈到 Tr_1 的发射极上，发射极电阻 R_E 的两端出现图示极性的电压。因为这个反馈电压使得



(a) 电流反馈电路　　(b) 电压反馈电路

图 3.22　负反馈放大电路

Tr_1 的基极与发射极间的电压减小，所以这是负反馈电路。称这种反馈电压 v_f 与负载 R_{C2} 上产生的电压成正比的反馈为电压反馈。

◆ 电流反馈电路的电压放大倍数和输入阻抗

图 3.23(a)所示那样的电流反馈电路，没有反馈时的电压放大倍数 A_v 可表示为：

$$A_v = \frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}} \tag{3.26}$$

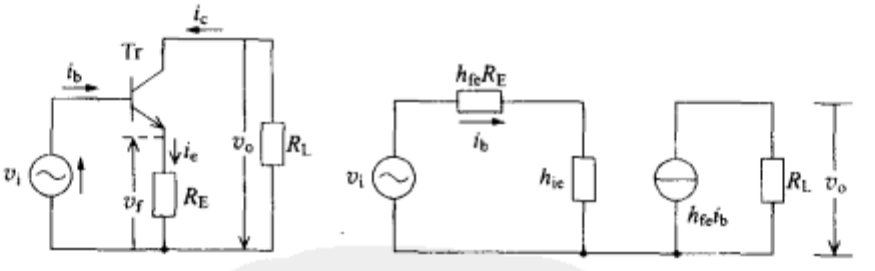
有反馈时的电压放大倍数 A_{vf}，如果 $i_e \approx i_c$，因为 $\beta = R_E/R_L$，所以 A_{vf} 可表示为：

$$A_{vf} = \frac{Av}{1+A_v\beta} = \frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}+h_{fe}R_E} \tag{3.27}$$

比较式(3.26)和式(3.27)可以看到，加了反馈后的输入阻抗是在没有反馈时的 h_{ie} 上再加上 $h_{fe}R_E$，可表示为：

$$R_i = h_{ie} + h_{fe}R_E = h_{ie}(1+A_v\beta) \tag{3.28}$$

这种电路适合于作为高输入阻抗电路使用。这时，图 3.23(a)的等效电路为图 3.23(b)所示那样。



(a) 电路例　　(b) 等效电路

图 3.23　电流反馈电路

◆ 电压反馈电路的电压放大倍数和输入阻抗

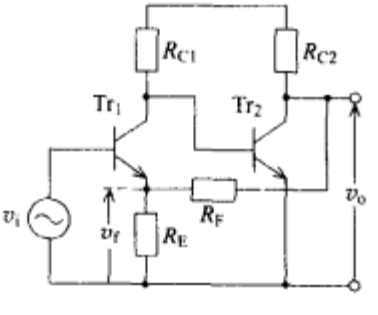


图 3.24　电压反馈电路

在图 3.24 所示的电压反馈电路里，如果 $R_F \gg R_E$，$R_F \gg R_{C2}$，那么，反馈系数就可表示为

$$\beta = \frac{R_E}{R_E+R_F} \approx \frac{R_E}{R_F} \tag{3.29}$$

因此，如令没有反馈时的总电压放大倍数为 A_v，那么，加了负反馈时的电压放大倍数 A_{vf} 即可表示为

$$A_{vf}=\frac{A_v}{1+A_v\beta}=\frac{A_v}{1+A_v\dfrac{R_E}{R_F}} \qquad (3.30)$$

另外，令 Tr_1 的 h 参数为 h_{fe1} 和 h_{ie1}，那么，输入阻抗可表示为

$$R_i=(1+A_v\beta)(h_{ie1}+h_{fe1}R_E) \qquad (3.31)$$

例 题

在图 3.25(a)所示的 RC 耦合放大电路里，试求去掉 C_E 后的电压放大倍数和输入阻抗。这里假定晶体管的 h 参数为 $h_{ie}=4k\Omega$，$h_{fe}=120$。

答 图 3.25(b)所示等效电路中，R_C 和 R_i' 的并联合成电阻为

$$R_L=\frac{R_CR_i'}{R_C+R_i'}=\frac{6\times3}{6+3}=2(k\Omega)$$

因此，电压放大倍数 A_{vf} 为：

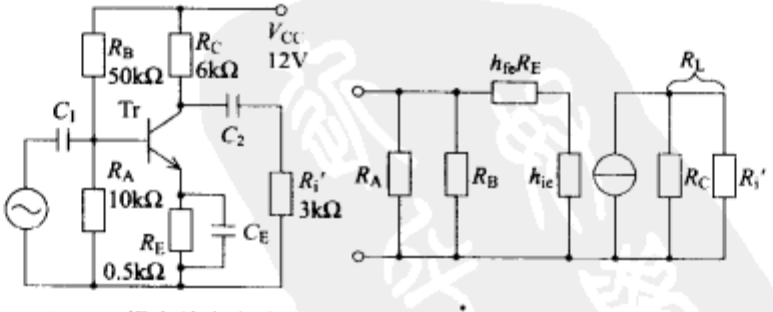
$$A_{vf}=\frac{h_{fe}R_L}{h_{ie}+h_{fe}R_E}=\frac{120\times2}{4+120\times0.5}\approx3.8$$

其次，从基极看到的输入阻抗为

$$R_i=h_{ie}+h_{fe}R_E=4+120\times0.5=64(k\Omega)$$

由于 R_A 与 R_B 和 R_i 并联，因此，从输入端看到的输入阻抗为

$$R_{if}=\frac{1}{\dfrac{1}{R_A}+\dfrac{1}{R_B}+\dfrac{1}{R_i}}=\frac{1}{\dfrac{1}{10}+\dfrac{1}{50}+\dfrac{1}{64}}\approx7.4(k\Omega)$$



(a) RC 耦合放大电路　　(b) 等效电路

图 3.25　串联反馈电路

9　功率放大电路

要　点

在晶体管放大电路中，特将对负载（如扬声器等）提供大信号功率的电路称为功率放大电路。功率放大电路根据工作点取法的不同，有 A 类功率放大电路和 B 类 PP 功率放大电路等。在和负载耦合方面也有使用变压器的。但最常使用的是不用变压器而能够直接驱动负载的 SEPP 电路。

解　释

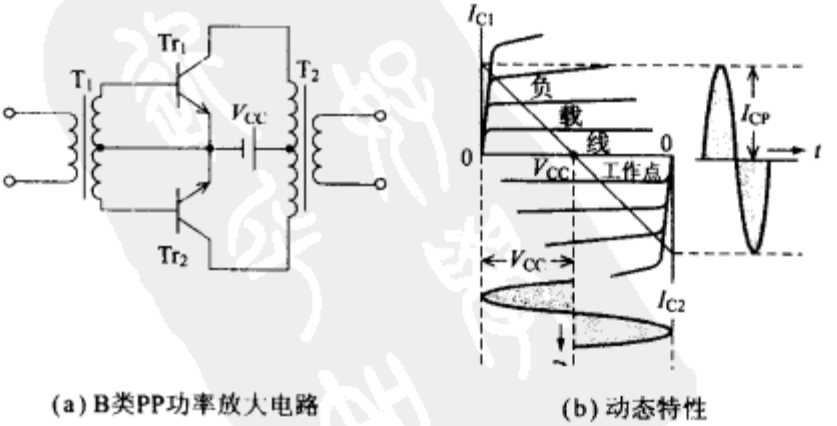
A 类放大电路

B 类放大电路

□ 功率放大电路的原理

采用输出变压器的 **A 类放大电路**，它的直流功率损耗大，电源效率也低，大约是 50%。另外，**B 类放大电路**因为只在信号输入时有集电极电流，所以，电源效率比 A 类放大电路好。但是，在 B 类放大的情况下，一个晶体管只能得到正弦波的半个周期，且波形有失真。故要如图 3.26(a)所示那样，再用一个晶体管来放大余下的半个周期，从而得到没有失真的正弦波输出。这就是 **B 类 PP 功率放大电路**（DEPP 电路），它的电源效率非常高，约为 78%。图 3.26(b)是该电路的动态特性。

B 类 PP 功率放大电路



(a) B类PP功率放大电路　　(b) 动态特性

图 3.26　DEPP 电路

SEPP 电路

图 3.27 是 **SEPP 电路**的原理。SEPP 电路是一种由特性相同的 pnp 型和 npn 型晶体管互补连接而成的功率放大电路。因为两个晶体管的极性是相反的，所以只要把输入端并联连接，就能按输入正弦波的正半周和负半周交替工作（推挽工作）。这个电路的最大输出功率可表示为

$$P_{om}=\frac{{V_{CC}}^2}{8R_L} \tag{3.32}$$

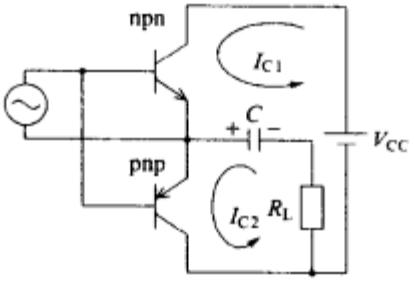


图 3.27　SEPP 电路的原理

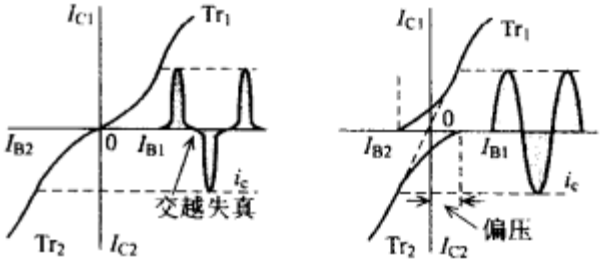


图 3.28　交越失真

相关知识

◆ 交越失真

B 类 PP 放大时，如果偏流为 0，那么，输出特性就如图 3.28(a)所示，输出波形会失真。把这种失真称为交越失真。为了减少这种失真，可像图 3.28(b)那样，加一个很小的偏置电流。

例 题

图 3.29 是 SEPP 电路的实例。这个电路的输出端用了 $R_L=8\Omega$ 的扬声器，欲设计最大输出功率 $P_{om}=12W$ 的 SEPP 电路时，求所需的电源电压 V_{CC}。

答　从式(3.32)可得

$$V_{CC}=\sqrt{P_{om}\times 8R_L}=\sqrt{12\times 8\times 8}\approx 28\ (V)$$

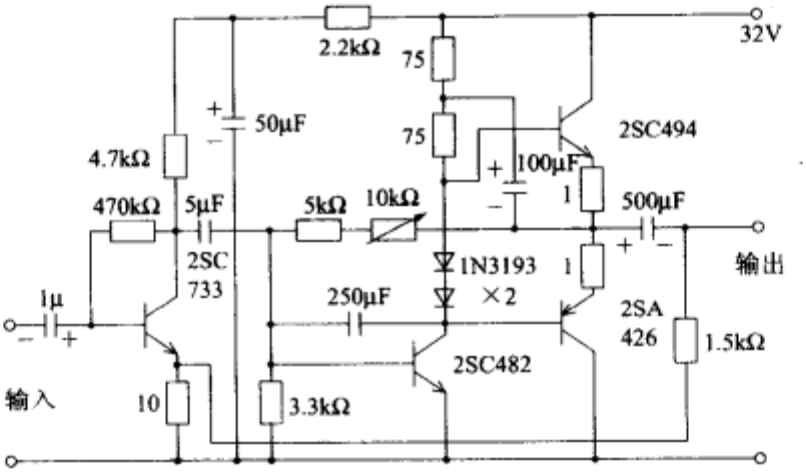

2.2kΩ
75
32V
50μF
75
2SC494
4.7kΩ
100μF
1
470kΩ
5μF
5kΩ
10kΩ
500μF
2SC
733
1N3193
×2
1
输出
1μ
250μF
2SA
426
1.5kΩ
2SC482
输入
10
3.3kΩ

图 3.29　SEPP 电路

10　高频放大电路

要　点

只在某特定频率范围内进行选择性放大的高频信号放大中，其负载常采用调谐电路。将放大器带宽窄的电路称为窄带放大电路，常用在收音机等设备里。与此相对应，将频带宽的放大电路称为宽带放大电路，常用于电视机、视频设备及宽带振荡电路等。

解　释

高频放大电路的原理

调谐式高频放大电路

图 3.30(a)是**调谐式高频放大电路**的例子。在晶体管输入端和输出端的高频变压器上并联有电容器的谐振电路就是调谐电路，两个调谐电路的调谐频率应保持相等。图 3.30(b)是调谐式高频放大电路的特性。如果令**调谐电路的品质**为 Q_0，那么，带宽可表示为

调谐电路的品质

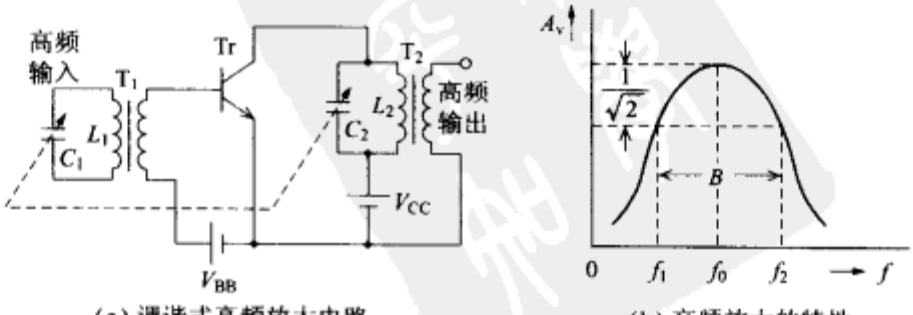
$$B=f_2-f_1=\frac{f_0}{Q_0} \tag{3.33}$$

也就是说，调谐电路的 Q_0 越大，带宽越窄，频率特性越尖锐。

另一方面，宽带放大电路以往一直采用参差调谐放大器，它是把调谐式高频放大电路进行多级连接，并且将其调谐频率一点一点错开，从而使总体特性得到所需的带宽。现在已采用由 IC 实现的**通用宽带放大电路**或者采用**校正法**，在晶体管电路中插入电感线圈来补偿高频增益的下降。

通用宽带放大电路

校正法



(a) 调谐式高频放大电路　　(b) 高频放大的特性

图 3.30　高频放大电路

高频放大电路里所用的晶体管需要满足以下条件：

特征频率

① **特征频率** f_T（表示晶体管好坏程度的量）要足够高；

② 集电极输出电容的值要小。

相关知识

◆ 用变压器中间抽头来改变阻抗

实际的调谐式高频放大电路里，因为晶体管的输出阻抗和负载与调谐电路并联，所以电阻减小，造成调谐电路的 Q_0 值下降。因此，不能得到谐振峰尖锐的特性。为了增加调谐电路的并联电阻的等效值，可以像图 3.31 所示那样，在变压器原边设置中间抽头，那么，图示的 R_0 和 R_L 就可像式(3.34)那样进行变换。

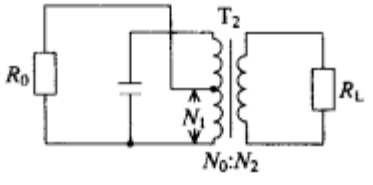


图 3.31　带中间抽头的变压器

$$R_0' = n_1^2 R_0, \quad R_L' = n_2^2 R_L \tag{3.34}$$

这里，$n_1 = N_0/N_1$，$n_2 = N_0/N_2$。通过改变变压器的匝数比 n_1 和 n_2，就可改变电阻 R_0' 和 R_L'，从而就能调节 Q_0 值和带宽。另外，如忽略变压器线圈的损耗，则阻抗匹配条件可表示为

$$\frac{R_0}{R_L} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \tag{3.35}$$

◆ 中频放大电路

调幅收音机的中频放大部分的变压器调谐频率是 455kHz。图 3.32 给出了这个中频放大电路的例子。图中的 IFT_1、IFT_2、IFT_3 都是中频变压器。称 C_N 为中和电容器，它起到抵消集电极输出电容、防止电路振荡的作用。

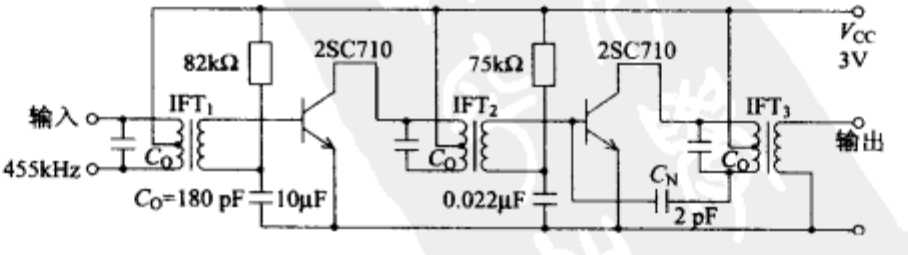


图 3.32　中频放大电路

11 FET 放大电路

要 点

与前面介绍的双极性晶体管(电流控制元件)相反,FET是电压控制元件。FET有输入阻抗高、噪声小的特点。而且,因为它受温度影响小且基极不需要直流电流,所以偏置电路的设计容易,故常在放大电路的初级和电容器话筒电路等中使用。

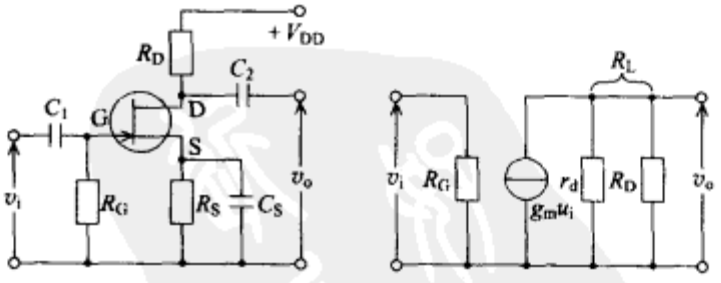
解 释

源极接地

FET 放大电路

图 3.33(a)是**源极接地**(相当于双极性晶体管的发射极接地)的 FET 基本放大电路。R_G 是用于给栅极加偏压的电阻,为了不使输入阻抗减小,电阻值要高。因为栅极没有电流,所以 R_G 上的压降为 0。因此,源极电阻 R_S 两端的电压降 V_S 就是栅极和源极之间的电压 V_{GS}($-V_S=-I_DR_S$)。

假定 FET 的跨导为 g_m($\Delta I_D/\Delta V_{GS}$(S)),输入电阻为 r_g,输出电阻为 r_d,因为 r_g 非常大,所以电路的输入阻抗就仅仅是 R_G。因为 C_1 和 C_2 的阻抗很小,可以忽略不计,所以等效电路如图 3.33(b)所示。



(a)源极接地电路　　(b)等效电路

图 3.33　FET 基本放大电路

由图 3.33(b)可知,输出电压可表示为

$$v_o=-g_m v_i R_L \tag{3.36}$$

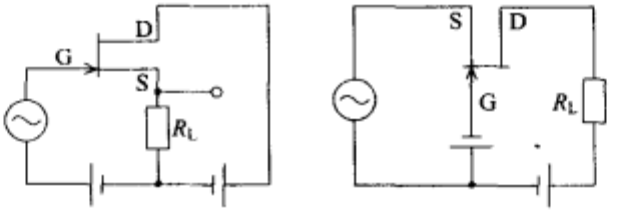
式中 $R_L=r_dR_D/(r_D+R_D)$。另外,电压放大倍数可表示为

$$A_v=g_m R_L \tag{3.37}$$

相关知识

◆ FET 的接地方式

除了常用的源极接地电路外，还有如图 3.34 所示的接地方式。图 3.34(a)所示为漏极接地电路，虽然电压增益比 1 小，可是因为输出阻抗小，所以适用于阻抗变换电路。另外，图 3.34(b)所示为栅极接地电路，因为从输出反馈到输入的电容小，所以这种电路被使用于高频放大。



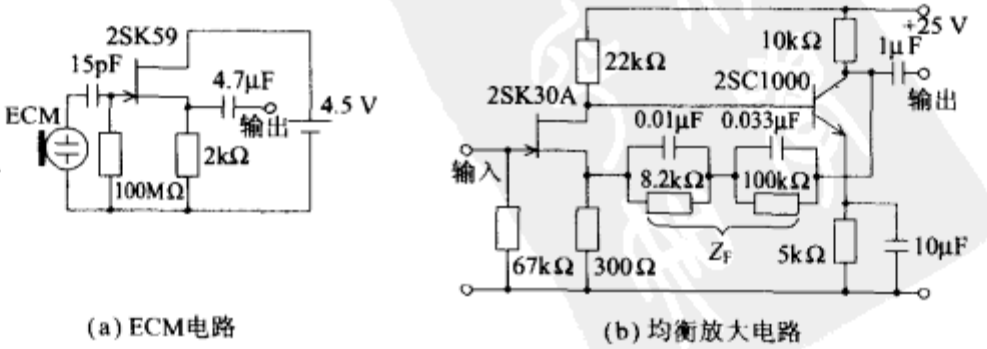
(a) 漏极接地电路　　(b) 栅极接地电路

图 3.34　FET 的接地方式

应用知识

ECM 电路与均衡放大电路

图 3.35(a)是常使用在磁带录音机和无线话筒里的驻极体电容器话筒(ECM)用的电路。这个电路采用漏极接地方式，将 ECM 的高输出阻抗变换成低输出阻抗(约 700Ω)，第二级以后都使用双极性晶体管。另外，图 3.35(b)给出了 FET 和双极晶体管相组合的均衡放大电路。这个电路采用了具有所需频率特性的反馈电路，把第二级的输出加到第一级，因为图中所示的 Z_F 阻抗随频率的增高而减小，所以反馈量随着频率增高而增大，于是，实现了总增益随频率增加而下降的均衡特性。



(a) ECM电路　　(b) 均衡放大电路

图 3.35　使用 FET 的电路例

12　运算放大器

要　点

运算放大器是既能放大信号也能进行加法、减法等运算的器件，所以称它为运算放大器。运算放大器具有放大倍数大、输入阻抗高和输出阻抗低等特点。利用这种放大电路能制成反相放大和同相放大等电路，其放大倍数由外加电阻之比来确定。运算放大器现已 IC 化。

解　释

运算放大电路

运算放大器是“operational amplifier”的简称。因为它能放大信号和进行加法、减法以及微分和积分等运算，所以称它为**运算放大器**。运算放大器与一般的放大器相比，它具有如下的特点：

运算放大器

① 放大倍数极大($10^4 \sim 10^6$)；

② 输入阻抗极高(约数十兆欧)；

③ 是一个差动放大电路；

④ 输出阻抗极小(约 50Ω)。

运算放大器的电路符号

图 3.36 给出了运算放大器的电路符号。运算放大器是具有两个输入端和一个输出端的放大器。一般需要使用正、负两个电源。

如图 3.37 所示那样，将输入信号加到反相输入端(－)，那么，在输出端就得到了和输入相位相反的输出。与此相反，如果在同相输入端(＋)加信号，那么，就得到和输入同相的输出信号。

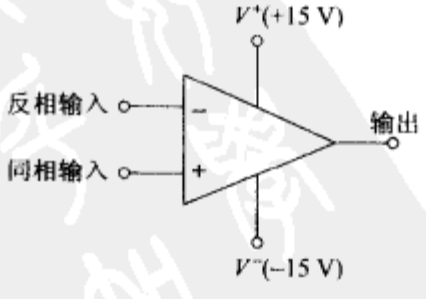
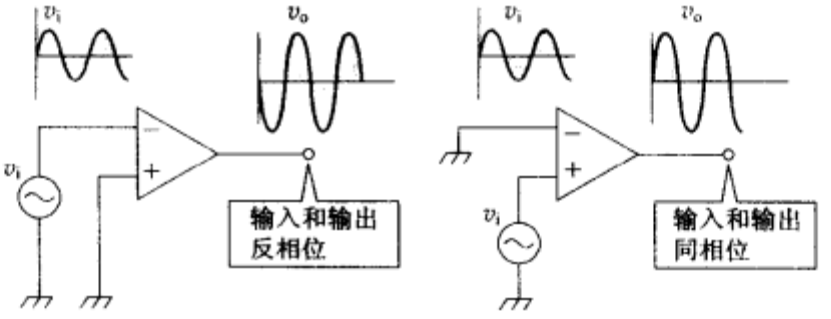


图 3.36　运算放大器的电路符号



(a) 反相放大　　(b) 同相放大

图 3.37　加在各输入端的信号及其输出

相关知识

◆ 反相放大器

把信号输入到反相输入端而进行放大的放大器称为反相放大器。

在图 3.38 里，如果输入端之间的电压为 v_s，流过 R_1 的电流为 i_1，流过 R_2 的电流为 i_2，则有

$$i_1 = \frac{v_i - v_s}{R_1} \tag{3.38}$$

$$i_2 = \frac{v_s - v_o}{R_2} = -\frac{v_o - v_s}{R_2} \tag{3.39}$$

因为运算放大器的输入阻抗极大，所以，可以认为输入电流为 0，于是得 $i_2 \approx i_1$。另外，如果运算放大器的增益为 A_o，那么，就得到 $v_o = -A_o \cdot v_s$，即 $v_s = -v_o/A_o$。如果假定 A_o 为无限大，那么 v_s 就等于 0。把这种状态称为虚拟短路。如果将 $v_s = 0$ 代入式(3.38)和式(3.39)，则 $v_i/R_1 = -v_o/R_2$。可见，增益为

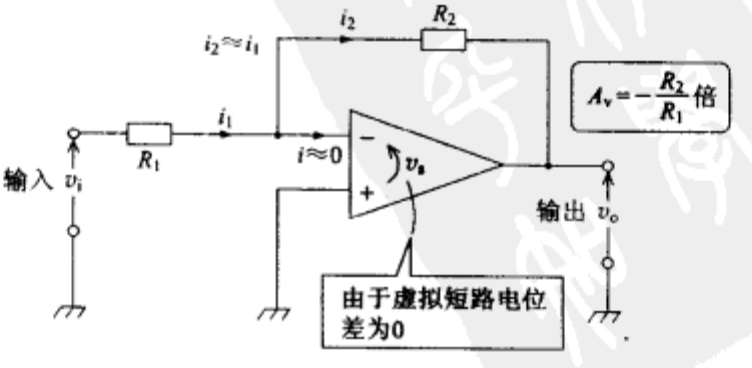


图 3.38　反相放大器

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \tag{3.40}$$

也就是说，反相放大器的增益是由外加电阻决定的。

另外，式(3.40)中的负号表示输出极性与输入极性相反，即相位相差180°。这种电路将输出的一部分返回到反相输入端。故称它为负反馈。

◆ 同相放大器

把信号输入到同相输入端而进行放大的放大器称为同相放大器。图3.39给出了同相放大器。

从这种虚拟短路可知，由于输入端之间的电位差为0，所以，输入电压 v_i 和 R_1 两端的电压相等。另外，因为输入阻抗极大，所以得到 $i_2 \approx i_1$。因为输出电压 v_o 等于 R_1 和 R_2 上的分压值，所以，输入电压应为

$$v_i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_o \tag{3.41}$$

所以

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \tag{3.42}$$

从式(3.42)可以看出：同相放大器也是由外加电阻来决定放大倍数。从式(3.42)可知 A_v 最小也比1大。

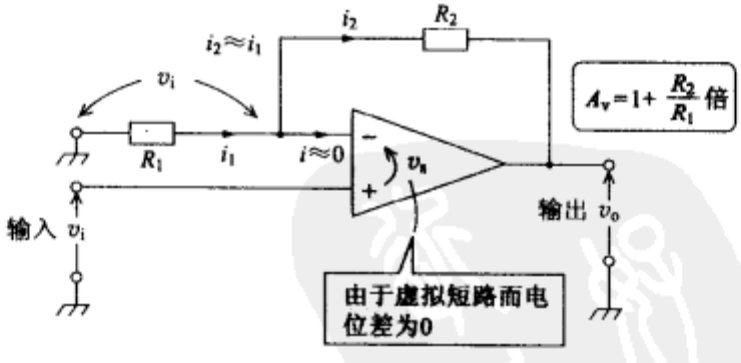


图 3.39 同相放大器

13　IC 化电路实例

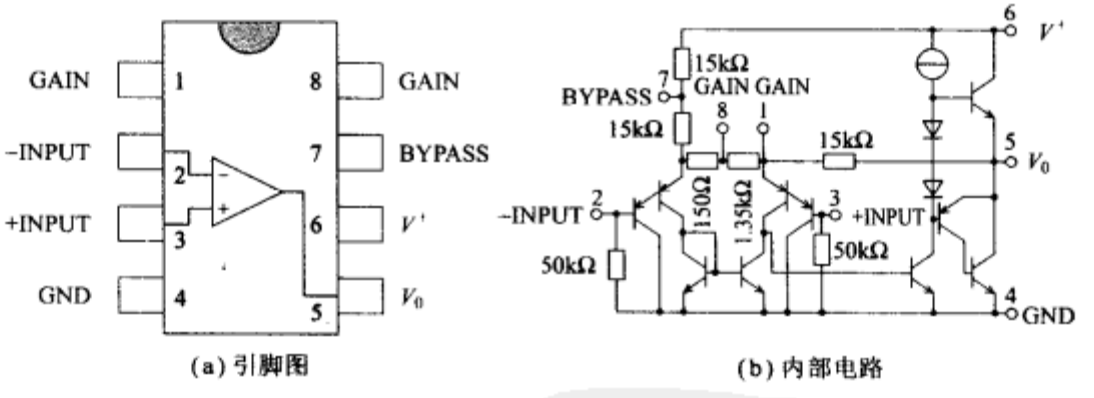
要　点

作为 IC 化电路的例子，可以举出的有音频放大器、VCO、PLL、IC 定时电路，以及差动放大电路等。

解　释

音频放大器

图 3.40 给出了 LM386 的引脚配置和内部电路。使用电源电压 6～9V，电压增益为 20 倍，在引脚 1 和 8 之间接入 10 μF 的电容器，可得 200 倍的输出。图 3.41 给出了输出 0.3W 的功率放大器实例。接在输出端的 C 和 R 是防止振荡用的。



(a) 引脚图　　(b) 内部电路

图 3.40　LM386 的引脚和内部电路

压控振荡器(VCO)

作为 VCO(Voltage Controlled Oscillator)专用的 IC 有 NE566 及 IC566 等。可通过外部直流电压来控制其振荡频率，改变方波和三角波的输出频率。图 3.42 给出了内部的方块图和连接图。

振荡频率由外接电阻和电容以及加在电流源电路上的直流电压来决定。振荡频率可由下式给出，即

$$f_0 = \frac{2}{R_1 C_1}\left(\frac{V^+ - V_C}{V^+}\right)$$

这种 IC 可在如下条件下使用。

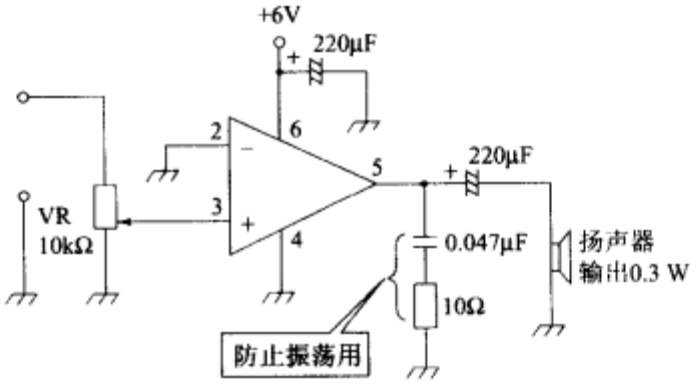


图 3.41　电路连接例

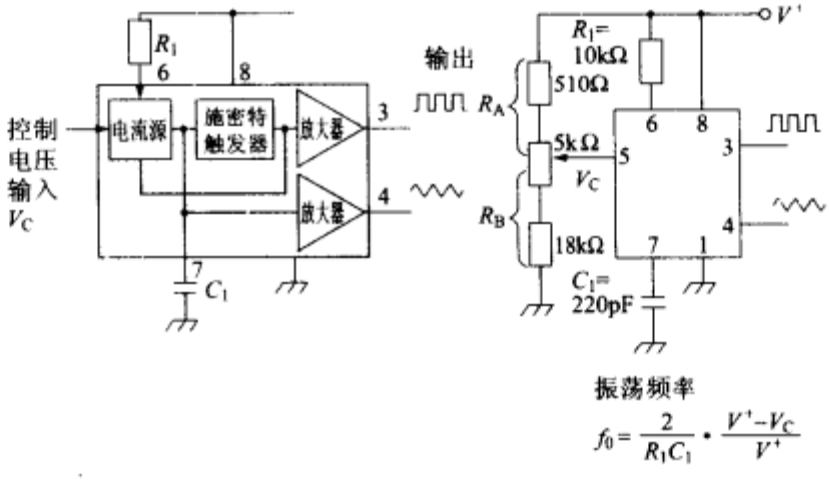


图 3.42　VCO 的方块图和连接图

① $2k\Omega \leqslant R_1 \leqslant 20k\Omega$；② $3/4V^+ \leqslant V_C \leqslant V^+$；③ f_0 在 1MHz 以下；④ V^+：10～24V。

IC 锁相环(PLL)

图 3.43 给出了 PLL(Phase Locked Loop)IC 的基本方块图。PLL IC 是使振荡器的输出信号与输入信号的相位差保持一定的反馈控制电路，它由相位比较器(PC)、环路滤波器(LPF)及压控振荡器(VCO)构成。在没有输入信号状态下，PLL 不能取得同步，VCO 的振荡与输入信号毫无关系。称这个振荡频率为**自由振荡频率**。加入输入信号后，相位比较器就产生一个与输入信号和 VCO 信号之间相位差相对

自由振荡频率

应的电压 V_c。该电压经低通滤波器平滑后成为 VCO 的控制电压。受该电压的控制，输入信号和 VCO 的频率之差将逐渐变小。其结果是 VCO 的振荡频率变得和输入信号频率相同，而相位差保持在某个固定值上。

PLL IC 是广泛用于 FM 解调器、频率合成器、电视同步信号发生电路及 VTR 的电机控制等的 IC。

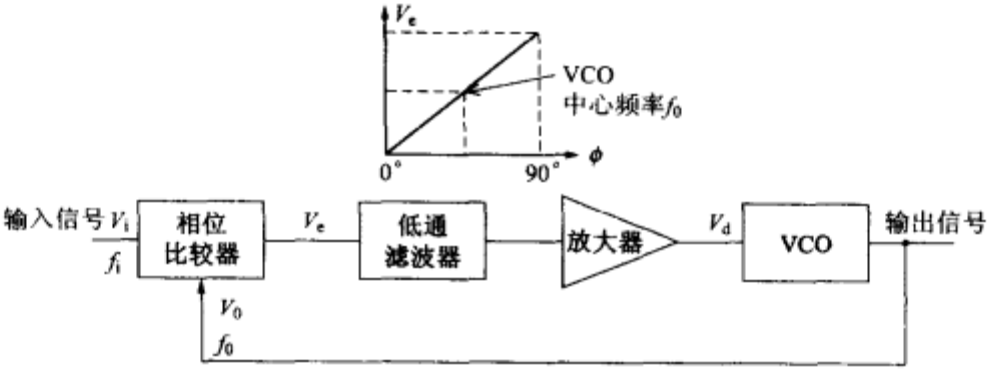


图 3.43　PLL IC 的基本框图

FM 解调器

图 3.44 给出了采用 PLL IC 来进行频率解调的例子。IC565 是 PLL IC，其内部有相位比较器、放大器和 VCO。外部连接的 R_1 和 C_1 决定着 VCO 的自由振荡频率，其频率调到可变范围的中心频率处。PLL 的中心频率调到 FM 载波的频率上。如果将受到频率调制的已调波加给输入端，就会输出与频率变化相对应的电压。也就是说，进行了 FM 解调。

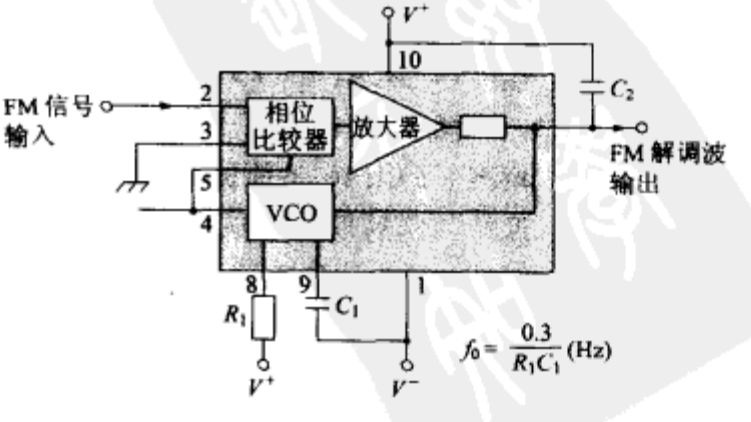
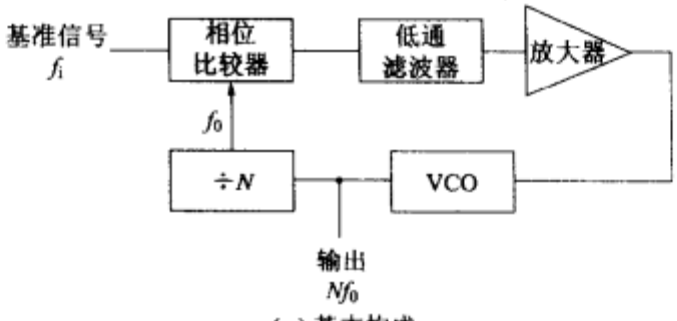


图 3.44　采用 PLL IC 的 FM 解调器

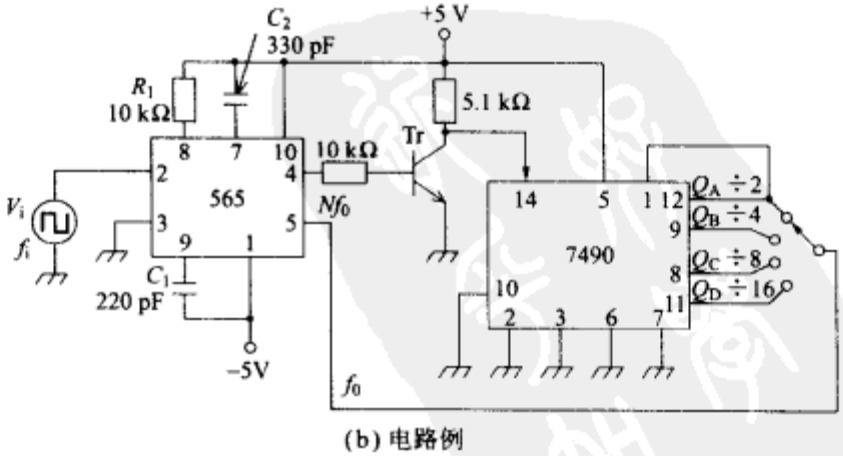
频率合成器

频率合成器如图 3.45(a)所示，是在基本 PLL IC 的电路里加进分频器的器件。能以适当的频率步长来改变输出频率，并能获得稳定频率信号的电路。其频率稳定度和标准信号相同，标准信号常使用频率稳定的晶体振荡器。

现在将 VCO 的输出频率用分频器进行 $1/N$ 分频，分频后的信号作为 f_0 加到相位比较器上。反馈控制起着使相位差达到保持在某个稳定值的作用，VCO 的输出就等于 Nf_0。也就是说，通过改变分频器的分频数 N，来得到频率为输入信号 N 倍的稳定输出。可以输出的频率范围取决于 VCO 的频率特性。图 3.45(b)是用 565 作为 PLL IC，用 7490 作为分频器的例子。



(a) 基本构成



(b) 电路例

图 3.45　频率合成器的基本构成及其电路例

IC 化定时电路

图 3.46 给出 IC 化定时电路和引脚。其内部是由两个比较电路和 RS 双稳态电路(RS-FF)及放电用的晶体管 Tr 组成的。将串联连接的三个电阻 R 与比较电路连接。在比较电路上加 $2/3V^+$ 和 $1/3V^+$ 的电压。比较电路 1 的门限输入电压一达到 $2/3Tr^+$ 以上，比较电路 2 就反转并复位 FF，Tr 饱和，将输出置成 0。另外，比较电路 2 的触发输入电压一达到 $1/3V^+$ 以上，FF 就复位，Tr 截止，输出变为 1。图 3.47 给出了无稳态多谐振荡器的实用例子和输出。

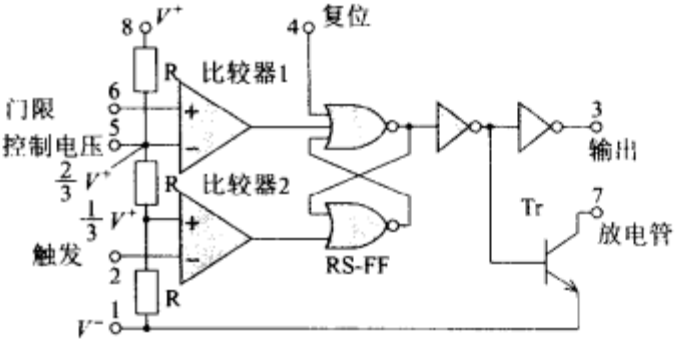
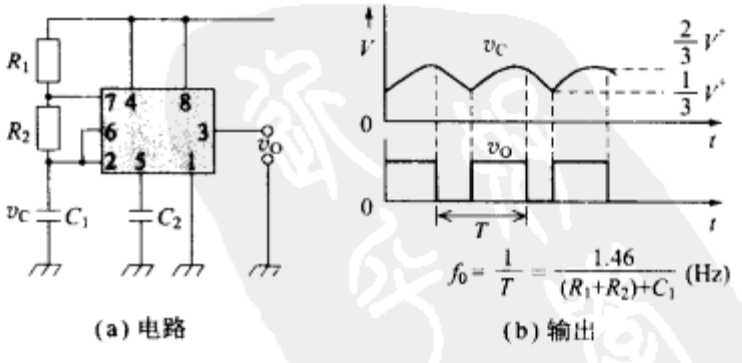


图 3.46　IC 化定时器的模块电路

IC 化定时电路广泛用于定时器、无稳态多谐振荡器、单稳多谐振荡器、脉宽调制及锯齿波发生器等。



(a) 电路　　(b) 输出

图 3.47　无稳态多谐振荡器

差动放大电路

图 3.48 给出了采用运算放大器的差动放大电路。现在来求如图 3.48 所示的输出电压。因为运算放大器的输入阻抗极大，所以，运算放大器没有输入电流。另外，由于流过

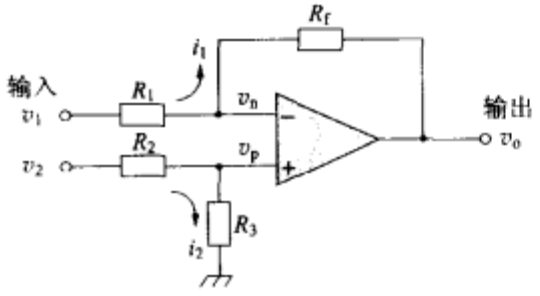


图 3.48 差动放大电路

R_1 和 R_f 的电流相等，则有

$$i_1 = \frac{v_1 - v_n}{R_1} = \frac{v_n - v_o}{R_f}$$

$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_n - \frac{R_f}{R_1} v_1$$

根据虚拟短路，$v_n = v_p$，所以上式变为

$$v_n = v_p = \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_2$$

把 v_n 代入 $v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) v_n - \frac{R_f}{R_1} v_1$ 中，则得

$$v_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} v_2 - \frac{R_f}{R_1} v_1$$

设 $R_1 = R_2$，$R_f = R_3$，即得

$$v_o = \frac{R_f}{R_1}(v_2 - v_1)$$

输入电压之差被以 R_f/R_1 倍放大。由于信号的同相共模成分相抵消，所以，它可作为消除两个信号里的共同噪声的电路来使用。

例 题

试求如图 3.42 所示接线图中，$R_A = 1\text{k}\Omega$，$R_B = 15\text{k}\Omega$，$V^+ = 12\text{V}$ 时的 f_0。

答 $$V_C = \frac{R_B}{R_A + R_B} \cdot V^+ = \frac{15}{1+15} \times 12 = 11.25(\text{V})$$

$$f_0 = \frac{2}{(10 \times 10^3)(220 \times 10^{-12})} \times \frac{12 - 11.25}{12} \approx 56.8(\text{kHz})$$

14　振荡的原理

要　点

把即使不从外部加信号，信号也连续发生的现象称为振荡。振荡有反馈式和负阻式两种，反馈式较常用。要用反馈式电路产生振荡，还需要有放大信号的电路、把信号返回到输入端的正反馈电路、以及决定信号频率的选频电路。

解　释

振荡的基本条件

身边经常出现振荡现象，如当提高拾音器的音量时扬声器发出“嗡嗡”声。在构成振荡电路的放大电路里，使用有晶体管、场效应晶体管及运算放大器等。反馈电路是作为频率选择电路进行工作的。

振荡的基本条件如下：

① 环路增益在 1 以上。

② 振荡频率是由反馈电路的虚部为 0 的条件来决定。

正反馈

振荡原理如图 3.49 所示。如果把已放大的信号按照与输入同相那样送到输入端（称为**正反馈**），那么输入信号就比以前有所增大。增大了的信号再放大，而后又由反馈电路送回。这样一来，返回输入端的信号将逐渐增大，不过，不可能无限地增大，达到某个定值时就不再增大了。称这种现象为**振荡**。这时，如果设放大器的放大倍数 v_o/v_i 为 A，反馈电路的反馈系数 v_f/v_o 为 β，那么，在振荡持续且输出恒定时，$v_i=v_f$，于是就有 $A\beta=1$ 的关系。把这个关系称为环路增益等于 1。它是振荡所需满足的基本条件之一。

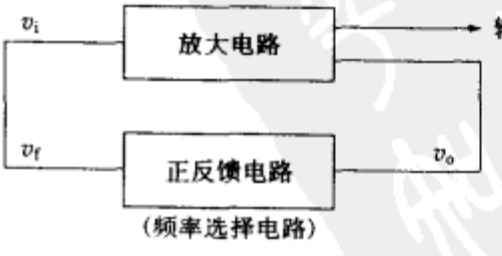


图 3.49　振荡的原理

相关知识

◆ *RC* 振荡器

把在反馈电路里使用 C 和 R 的电路称为 RC 振荡电路，而将使用 L 和 C 的电路称为 LC 振荡电路。反馈系数 β 可用复数公式表示。从这个公式的虚部等于 0 的条件可求出振荡频率。当频率为这个振荡频率时，输入端就有正反馈。这是产生振荡的另一个基本条件。

既然没有从外部加信号，为何还有信号输出呢？

其实并不是一下子就进入振荡状态的。一般情况下，电路里总有噪声（如晶体管和电阻内的热噪声），这种噪声就好像是振荡的“种子”。最初的噪声“种子”被振荡器电路中的放大器所放大，被放大的“种子”噪声又通过反馈电路返回到输入端。返回的噪声比最初的增大了 A 倍。这时，如果反馈电路具有频率选择性，那么，特定频率的衰减就减小。这样就会引起振荡。表 3.1 给出了各种正弦波振荡电路的分类。

表 3.1　正弦波振荡电路的分类

反馈式振荡器	*RC* 振荡电路	相位式 维恩电桥式
	LC 振荡电路	调谐式：集电极调谐式，基极调谐式，发射极调谐式 科耳皮兹式 哈脱莱式
	晶体振荡电路	皮尔斯 C-B 式 皮尔斯 B-E 式

RC 振荡电路用于低频振荡器，*LC* 振荡电路和晶体振荡电路用于高频振荡器。

例　题

RC 振荡器的频率精度约为 5×10^{-2}，晶体稳频振荡器的精度约为 5×10^{-6}。试求标称频率是 1MHz 的各种振荡器的频率偏差。

答　假定振荡频率为 f_0，精度为 δ，那么频率偏差 Δf 从 $\Delta f=\delta f_0$ 可得

$$\Delta f_1=\delta f_0=5\times10^{-2}\times10^6=5\times10^4=50(\text{kHz})$$

$$\Delta f_2=\delta f_0=5\times10^{-6}\times10^6=5(\text{Hz})$$

从结果可以看出：*RC* 振荡器的频率偏差是 50kHz，即在 1MHz±50kHz 范围内振荡。而晶体振荡器的频率偏差是 5Hz，即在 1MHz±5Hz 范围内振荡。

15 LC 振荡电路

要 点

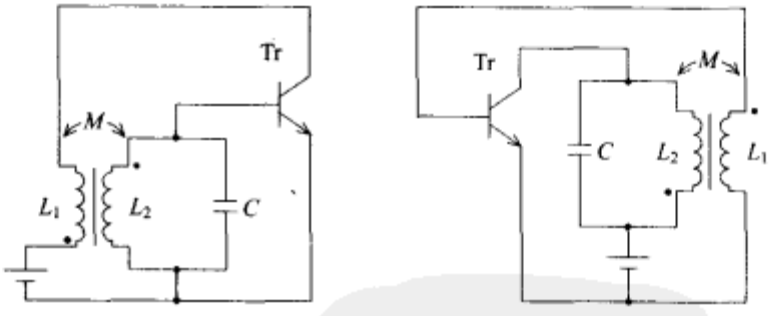
把在反馈电路里采用线圈 L 和电容器 C 进行频率选择的电路称为 LC 振荡电路。LC 振荡电路中有调谐式、哈脱莱式及科耳皮兹式。

解 释

调谐式振荡电路(反向耦合振荡电路)

图 3.50 给出了调谐式振荡电路。两组线圈是以互感 M 进行耦合。这是为了将输出的一部分返回到输入。L_1 和 L_2 的耦合方向应符合返回信号和输入信号相加的关系。图中的圆点符号是表示相位方向相同。振荡频率可用下式给出,即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C}} (\text{Hz})$$



(a) 基极调谐振荡电路　　(b) 集电极调谐振荡电路

图 3.50　调谐式振荡电路

哈脱莱振荡电路

哈脱莱振荡电路是从一个线圈取出一个抽头,从抽头去看,上、下线圈两端的电压具有 180°相位差。图 3.51(a)给出了它的原理,同图 3.51(b)给出了实用电路。其振荡频率可用下式给出,即

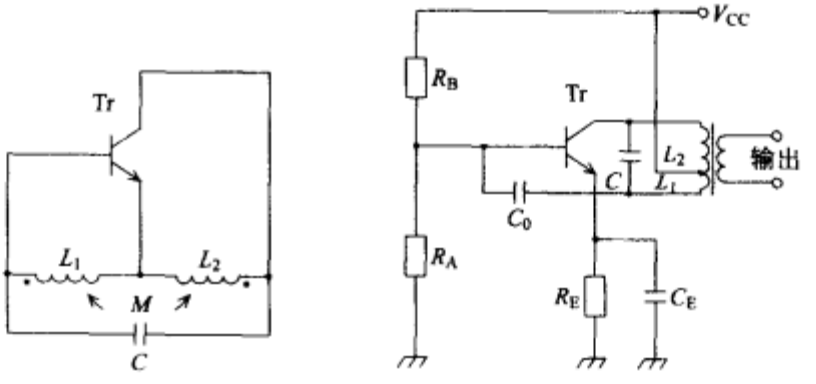
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2 + 2M)C}} (\text{Hz})$$

科耳皮兹振荡电路

将哈脱莱电路中的线圈和电容器交换位置，所得到的电路称为科耳皮兹振荡电路。图3.52(a)给出了其原理，而图3.52(b)给出了实用电路。振荡频率可用下式给出，即

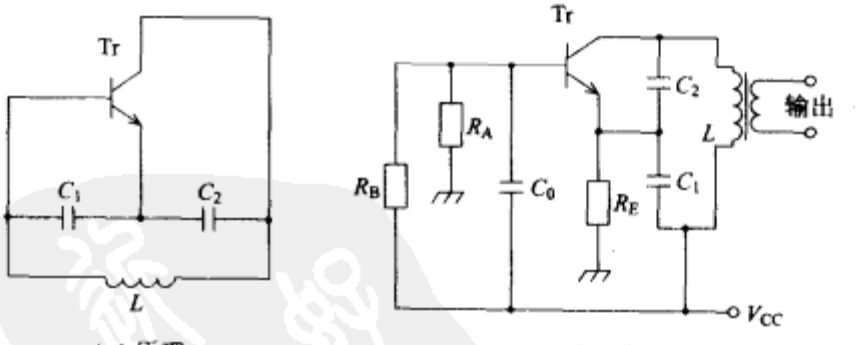
$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}\ (\mathrm{Hz})$$

式中，$C_0=C_1\cdot C_2/(C_1+C_2)$。



(a) 原理　　(b) 实用电路

图3.51　哈脱莱振荡电路



(a) 原理　　(b) 实用电路

图3.52　科耳皮兹振荡电路

例　题

图3.50所示集电极调谐式振荡电路中，$L_2=10\mu\mathrm{H}$、$C=250\mathrm{pF}$时，试求振荡频率。

答　$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C}}$$

$$=\frac{1}{2\times3.14\times\sqrt{10\times10^{-6}\times250\times10^{-12}}}=3.18(\mathrm{MHz})$$

16 RC 振荡电路

要 点

将反馈电路里采用电容器 C 和电阻 R 进行频率选择的振荡电路称为 RC 振荡电路。它有移相式和维恩电桥式两种。

解 释

移相式振荡电路

移相式振荡电路如图 3.53 所示，它是经三组 RC 反馈到输入端的电路。因为运算放大器的反相输入端和输出端之间有 180°的相位差，所以，如果再用三组 RC 将相位后移 180°，那么，反馈信号将成为和输入同相位，于是成为正反馈而振荡。

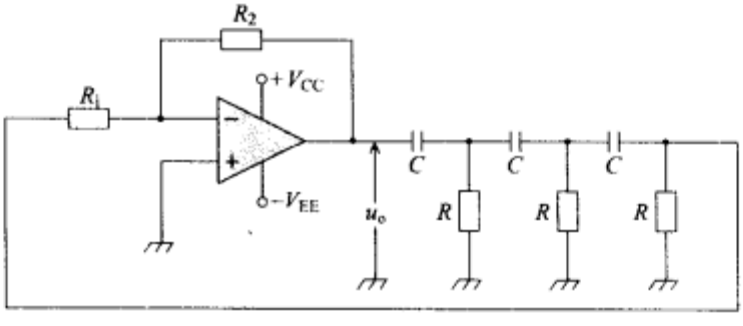


图 3.53 移相式振荡电路

这个电路的振荡频率 f_0 及反馈系数 β 可用式(3.43)给出：

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}(\mathrm{Hz}),\quad \beta=\frac{1}{29} \tag{3.43}$$

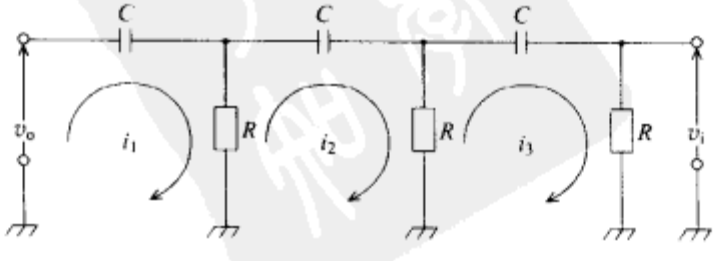


图 3.54 移相电路

式(3.43)中的振荡频率及反馈率 β，可按照图 3.54 所示的三组 RC 电路的 v_o 与 v_i 的相位应错开 180°的条件，通过以下的步骤求得。

应用基尔霍夫第 2 定律建立方程，即得(因为要用行列式求解，所以方程整理成 i_1、i_2、i_3 分别成列)

$$\begin{aligned}
&(R-jX)i_1 &&-Ri_2 &&0 &&=v_o\\
&-Ri_1 &&+(2R-jX)i_2 &&-Ri_3 &&=0\\
& &&-Ri_2 &&+(2R-jX)i_3 &&=0
\end{aligned}$$

用行列式求 i_3 得

$$i_3=\frac{\begin{vmatrix}(R-jX) & -R & v_o\\ -R & (2R-jX) & 0\\ 0 & -R & 0\end{vmatrix}}{\Delta}=\frac{v_oR^2}{\Delta}$$

而 Δ 为：

$$\begin{aligned}
\Delta&=\begin{vmatrix}(R-jX) & -R & 0\\ -R & (2R-jX) & -R\\ 0 & -R & (2R-jX)\end{vmatrix}\\
&=R(R^2-5X^2)-jX(6R^2-X^2)
\end{aligned}$$

$$i_3=\frac{v_oR^2}{R(R^2-5X^2)-jX(6R^2-X^2)} \tag{3.44}$$

运算放大器的输入电压为

$$v_i=i_3R=\frac{v_oR^3}{R(R^2-5X^2)-jX(6R^2-X^2)} \tag{3.45}$$

电路振荡状态下的增益为

$$\begin{aligned}
A_v=\frac{v_o}{v_i}&=\frac{R(R^2-5X^2)-jX(6R^2-X^2)}{R^3}\\
&=\frac{1}{R^2}(R^2-5X^2)-j\frac{X}{R^3}(6R^2-X^2)
\end{aligned} \tag{3.46}$$

因为增益为实数，故取式(3.46)的虚部为 0，即得

$$\begin{aligned}
&6R^2-X^2=0\\
&X^2=6R^2\\
&X=\sqrt{6}R
\end{aligned} \tag{3.47}$$

根据 $X=\frac{1}{\omega C}$，$\omega=2\pi f$ 得

$$\omega=\frac{1}{\sqrt{6}RC}$$

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \tag{3.48}$$

将式(3.47)代入式(3.46)即可求得 A_v 的大小为

$$|A_v|=1-\frac{5X^2}{R^2}=1-30=|-29|=29$$

即此电路的振荡频率 f_o 及反馈系数 β 可求得为

$$f_o=\frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

$$\beta=\frac{1}{29}\quad(\text{因为 } A_v\beta=1)$$

维恩电桥式振荡电路

图 3.55(a)给出了维恩电桥式振荡电路。而图 3.55(b)是画成另一种形式的维恩电桥的电路。从虚拟短路条件可知，运算放大器的两个输入端间的电压(b～c 间电压)是 0。所以，从电桥平衡条件可得

$$\left(R_1+\frac{1}{j\omega C_1}\right)R_4=\left\{\frac{R_2\cdot\frac{1}{j\omega C_2}}{R_2+\frac{1}{j\omega C_2}}\right\}R_3$$

展开上式，从实部的表达式可求得

$$\frac{R_3}{R_4}=\frac{R_1}{R_2}+\frac{C_2}{C_1}$$

另外，振荡频率 f_0，从虚部的表达式为 0 可求得

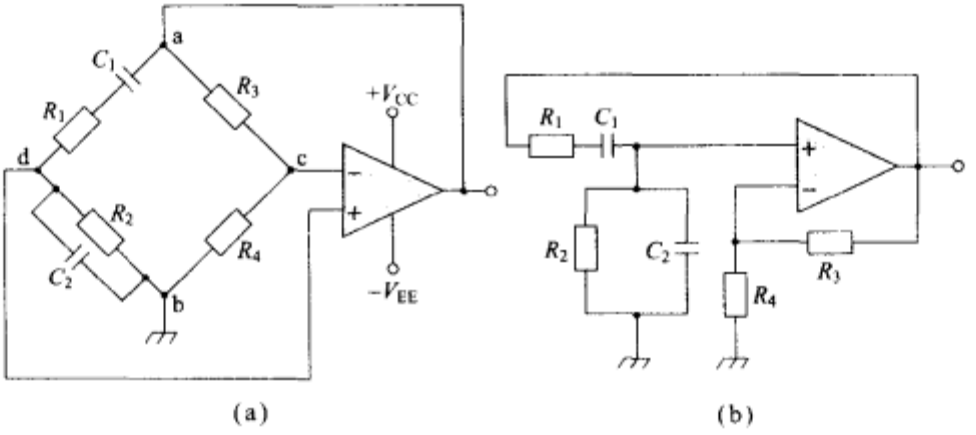
$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$$

假如 $R_1=R_2=R$，$C_1=C_2=C$，则得

$$f_0=\frac{1}{2\pi RC}$$

$\frac{R_3}{R_4}=1+1=2$，所以，$A=1+\frac{R_3}{R_4}=3$

也就是说，如果由运算放大器制成的同相放大器的增益在 3 以上，那么，就满足了振荡的条件。



(a)　　(b)

图 3.55　采用运算放大器的维恩电桥振荡电路

例　题

在图 3.55 里，$R_1=R_2=20\text{k}\Omega$，$C_1=C_2=0.001\mu\text{F}$ 时，试求振荡频率。

答　$f_0=\dfrac{1}{2\pi RC}$

$$=\frac{1}{2\pi(20\times10^3)\times(0.001\times10^{-6})}\approx7.960(\text{kHz})$$

题外话

日本电力事业开始时的电灯照明费

1886 年(明治 19 年)，日本最早以供电为目的的东京电灯公司开业了。其后，到全东京城普及电灯大约花了 30 年。试问，普及前(明治 44 年)的电费大概是多少？

根据记载，大约 10W 的灯泡(当时约 10 烛光那么亮，现在看来是太暗啦！)整晚上都点着，一个月的电费为 1.40 日元。这钱换算到现在，则相当于大约 20kg 大米或 40 碗拉面。

题外话

发光二极管也能成为发电二极管

“反过来也对”这句谚语也能用于电领域。众所周知，电机供电后能旋转，转动电机能发电。同样的电机，既能成为电动机又能成为发电机。

这也同样能用于作为电子元件的发光二极管。发光二极管，原来的功能是将电流变换为光照，即是用于将电能变为光能的器件。相反，如果用光去照射发光二极管，光能也能变换成电能而产生电子的移动（电流）（如果要自己做实验时，最好使用超高亮度的发光二极管）。

17　晶体振荡电路

要　点

石英晶体具有不随温度等变化而变化的、稳定的固有振荡频率。因此，采用石英晶体的振荡器的振荡频率，即使周围的温度、湿度和电源电压变化也几乎不变化。将 LC 振荡电路的 L 部分换成石英晶体振子，即可得到科耳皮兹振荡电路和哈脱莱振荡电路。

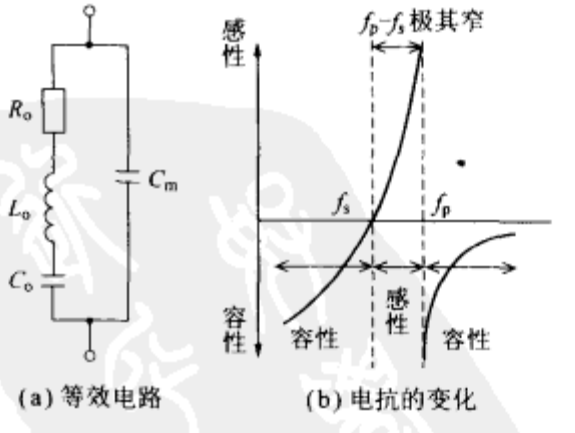
解　释

石英晶体振荡电路

压电效应

对石英晶片施加压力就产生正、负电荷，反过来，对晶片施加电压就产生晶片的机械性形变。称这一现象为晶片的**压电效应**。加在晶体上的直流电压，加了又断，断了又加，由于其相互影响，于是就形成了以固有的频率进行振动。这一振荡频率因为不受周围温度、湿度的影响，所以常被用在振荡电路里。

图 3.56(a)是石英晶体振子的等效电路。图 3.56(b)是电抗随频率变化的曲线。



(a) 等效电路　　(b) 电抗的变化

图 3.56　石英晶体振子的等效电路和电抗的变化

由等效电路可得串联谐振频率为

$$f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_0C_0}}$$

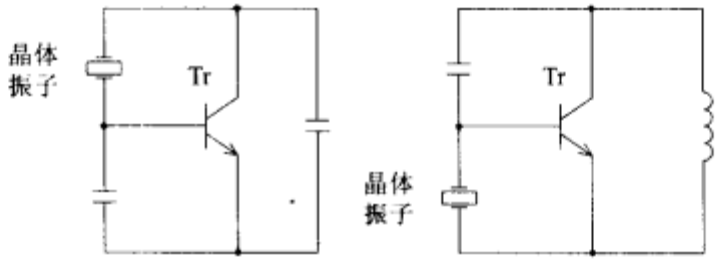
又并联谐振频率为

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0\left(\frac{C_0 C_m}{C_0 + C_m}\right)}}$$

从图 3.56(b)的电抗变化可知，串联谐振频率 f_s 到并联谐振频率 f_p 之间，振子是作为电感 L 进行工作的，其频率区间为 $f_p \sim f_s$。但实际上，因为 $C_0 \ll C_m$，所以，$f_s \approx f_p$。

石英晶体振荡器的基本电路

LC 振荡电路的 L 部分可用晶体振子置换(见图 3.57)。



(皮尔斯CB)　　(皮尔斯BE)

(a) 科耳皮兹式　　(b) 哈脱莱式

图 3.57　石英晶体振荡电路的基本原理

相关知识

◆ 科耳皮兹振荡电路(见图 3.58)

图 3.58 给出了科耳皮兹振荡电路的实际电路。

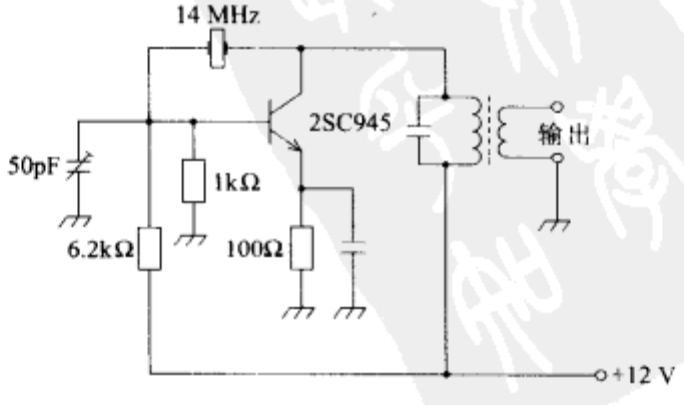


图 3.58　科耳皮兹振荡电路

应用知识

晶体振子

为了使晶体振荡器得到高的频率稳定度，在从石英晶体上切下晶体振子时，应选择振子温度系数小的切割方法；另外，工作时还要将晶体振子放入恒温槽里，使它周围的温度保持恒定，以得到很高的频率稳定度。

18 频率变换电路

要 点

把交流信号的某一频率变换成另一频率，称为频率变换。收音机中就是把接收到的广播电台的频率变换成比其低的频率，经过放大后再恢复成声音。把两个交流信号加到有非线性的元、器件上就能够进行频率变换。

解 释

频率变换的原理

如图 3.59 所示那样，如果将频率分别为 f_1、f_2 的两个信号加到具有非线性输入、输出特性的二极管、三极管或 FET 上，那么，在输出端就会产生频率为 f_1 与 f_2 之和 (f_1+f_2)和差$(f_2-f_1)(f_2>f_1)$的信号。称此现象为**拍频现象**。

拍频现象

和频信号和拍频信号，可以用设在输出端的调谐(谐振)电路选出。

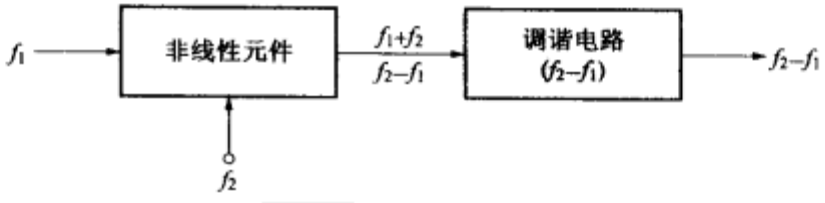


图 3.59 拍频现象

频率变换的用途，可以举出如下实例：

① 用频率完全相同的放大器制成多级放大器时，容易产生后级反馈引发的振荡，这一问题可通过频率变换的办法予以防止。

② 对调谐频率较低的信号，调谐电路的带宽可以做得窄些。其结果，可以防止同时听到两个以上广播电台的现象。

③ 无线中继站中采用改变接收波和发射波的频率来防止收、发间的干扰。

相关知识

◆ 调幅收音机的频率变换电路

图 3.60 所示为超外差式调幅收音机的方框图。从天线进入收音机的电波，在混合电路中与本机振荡电路的信号进行混合。于是，在调幅收音机里，将频率变换成 455kHz。

而在调频收音机里，则是将频率变换成 10.7MHz。然后在后面的电路里经过放大、检波后，得到原来的声音。

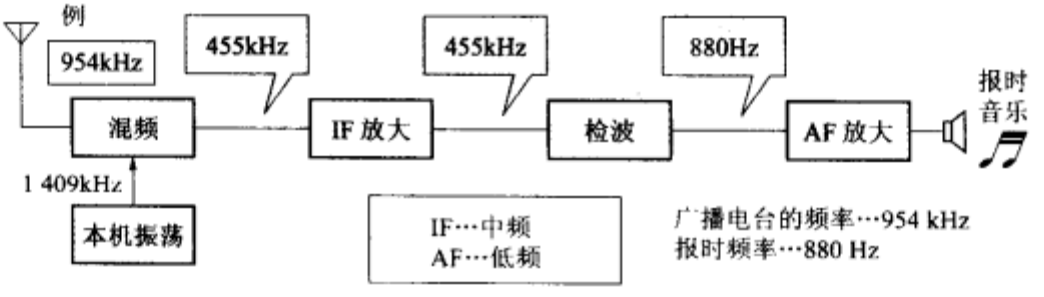


图 3.60　调幅收音机的方块图

图 3.61 给出了频率变换中的混频电路实例。它是用一个晶体管对本机振荡和接收频率进行混频，称其为自激式频率混合电路。来自磁棒天线的电台频率 f_1 和本机振荡频率 f_2 在晶体管中进行混合。负载线圈与谐振频率为 f_2-f_1（=455kHz）的并联谐振电路相连，该电路只选取 455kHz（它等于 f_2-f_1）的信号进行放大。也就是说，电台发射的电波经过频率变换后送往下一级。调谐频率 f_1 和振荡频率 f_2 可用双连可变电容器连续调节，而将 f_2 与 f_1 的差始终保持为 455kHz。

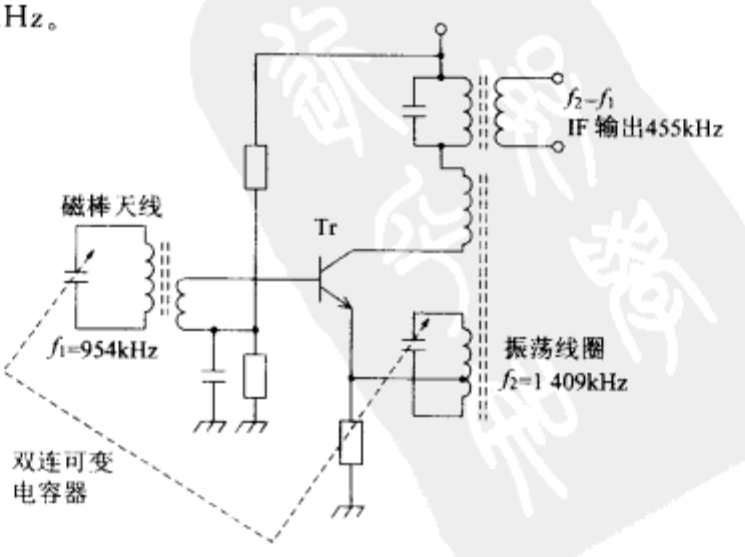


图 3.61　本机振荡和混频电路

19　调制电路

要　点

把声音等低频信号搭载到作为电波的高频上称为调制。因为这时的高频只起到运送声音的作用，所以，称此高频波为载波。被调制过的高频波称为已调波。

解　释

调幅原理

调幅

调幅（AM：Amplitude Modulation）是用声音等信号改变高频波振幅的方法。它被用在中波电台和电视图像的调制中。图 3.62 给出了 AM 调制电路的例子。

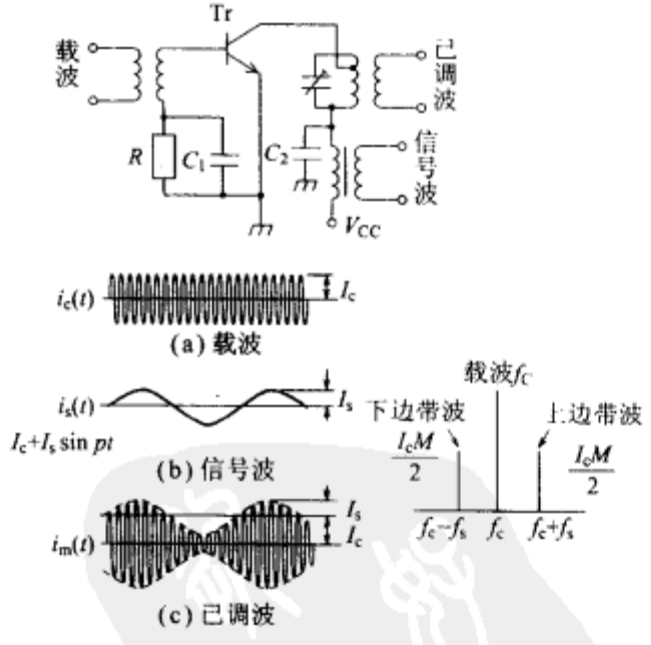


图 3.62　集电极调制电路和已调波及其频谱

假定载波电流为 i_c，信号波电流为 i_s，则这时的已调波的电流 i_m 可如下求得：

$$i_c = I_c \sin \omega t \tag{3.49}$$

式中，$\omega = 2\pi f_c$（f_c 是载波的频率）。

$$i_s = I_s \sin pt \tag{3.50}$$

式中，$p = 2\pi f_s$（f_s 是信号的频率）。

如果用 i_s 调制 I_c，则如图 3.62 所示那样，已调波的最

大值按式(3.51)变化。

$$I_c + I_s \sin pt \tag{3.51}$$

式(3.51)中电流随载波频率而变化，所以已调波的电流 i_m 可以写成

$$i_m = (I_c + I_s \sin pt)\sin\omega t \tag{3.52}$$

$$= I_c\left(1 + \frac{I_s}{I_c}\sin pt\right)\sin\omega t \tag{3.53}$$

调制度
调制系数

称式(3.53)中 I_s/I_c 称为**调制度**，并用 M 表示。另外，将它的百分比称为**调制系数**。令 $I_s/I_c = M$，代入式(3.53)，则得

$$i_m = I_c(1 + M\sin pt)\sin\omega t$$

$$= I_c \sin\omega t + I_c M \sin\omega t \sin pt \tag{3.54}$$

用三角函数公式展开式(3.54)可得

$$i_m = I_c \sin 2\pi f_c t + \frac{I_c M}{2}\cos 2\pi (f_c - f_s)t$$

$$- \frac{I_c M}{2}\cos 2\pi (f_c + f_s)t \tag{3.55}$$

式(3.55)的第一项是载波，第二、第三项分别是下边带波和上边带波。

相关知识

◆ 调频原理

将用声音等低频信号改变载波频率的调制方式称为调频(FM：Frequency Modulation)方式。如图 3.63(c)所示，已调波的振幅不变，而频率随信号波增高或降低。频率调制占有频带很宽，因此音质好而被用在调频广播等中。图 3.63 是把声音信号加在变容二极管上来改变电容量，并以此来改变振荡频率的例子。

◆ 单边带调制的原理

调幅(AM)的已调波具有如图 3.64 所示那样的频谱。由式(3.55)可以看出，已调波的信号成分中会有上边带波和下边带波，所以，即使把载波抑制掉再传送，信号带仍能再生。不仅如此，就连把上边带波或下边带波中的一边抑制掉，信号还是能再生，这种方式称为单边带(SSB：Single Side Band)调制。

为了得到 SSB 波，需要有如图 3.64(b)所示的能抑制载波的平衡调制器和能取出一个边带波的带通滤波器。

采用这种方式的特点是只使用单边带，所以占有频率带宽只用 1/2 就够了。因此，能够利用的频道就变为 2 倍。另外，发射功率也只有 100% 调制的调幅波的 1/4。其缺点是电路变得复杂了，但由于带宽只用一半，所以，常在通信中使用。

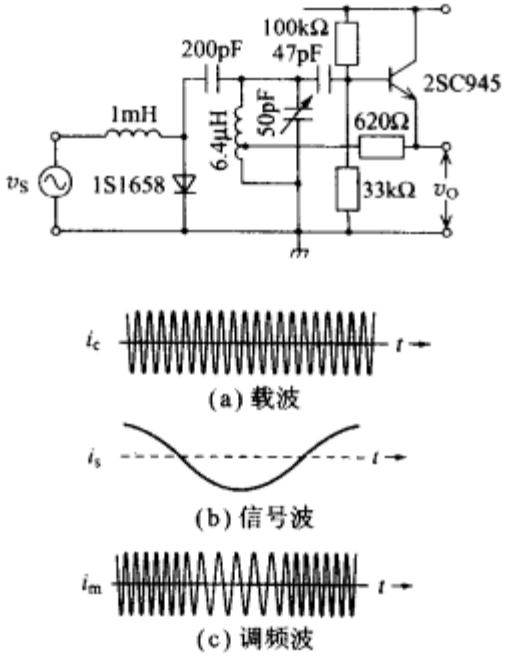


图 3.63　调频电路和已调波

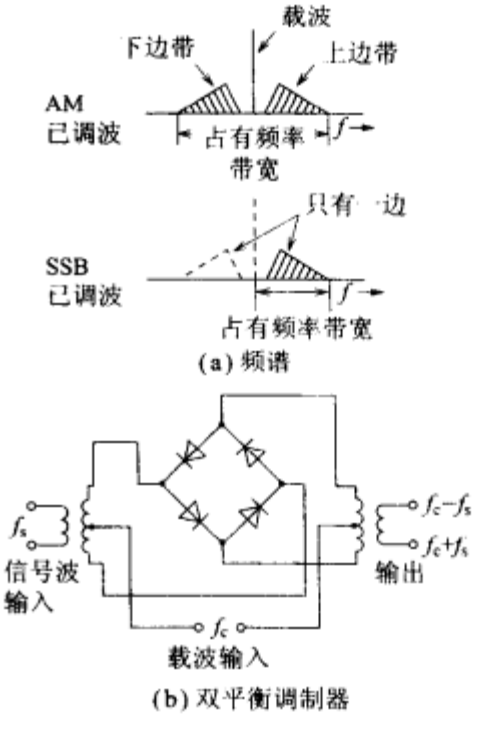


图 3.64　SSB 调制的频谱和双平衡调制器

20　解调电路

要　点

将采用与调制相反的操作，从已调波中取出信号波的过程称为解调（检波）。解调有AM解调和FM解调等。解调元器件一般使用锗二极管。

解　释

□ 调幅（AM）波的解调

将从AM已调波取出信号的过程称为AM解调，解调也称检波。元件一般是使用锗二极管。它有利用二极管平方特性的**平方律检波**和利用直线部分的直线检波两种。**直线检波**可再分为**平均值检波**和**包络线检波**。这里来讨论包络线检波。图3.65给出了解调电路。在这个电路里用二极管进行整流之后，再用RC进行滤波，然后再用耦合电容器隔离直流部分就可得到所需的信号。

平方律检波
直线检波
平均值检波
包络线检波

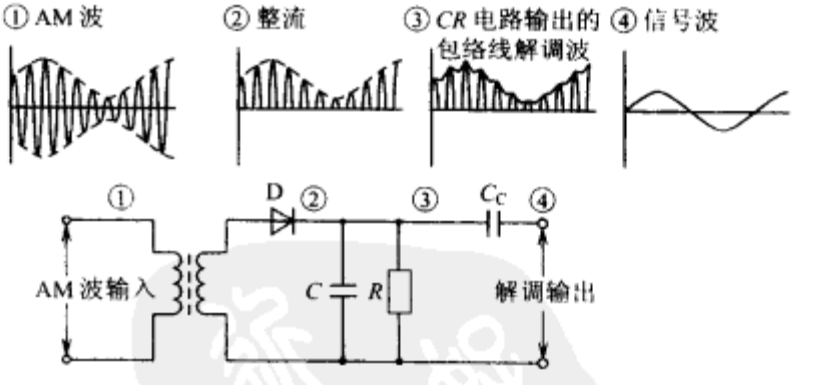


图3.65　AM波的解调

相关知识

◆ 调频（FM）波的解调

把频率变化变为振幅变化的过程就是FM解调。其原理是首先利用谐振电路的频率偏离谐振点时，输出大小即发生变化的特性，把调频波变成调幅波，再对调幅波进行振幅解调来取出信号。图3.66所示的双调谐频率鉴别器是由两个调谐电路和两个包络线解调电路构成。首先，把FM波加到谐振频率已调谐在FM波中心频率f_0的LC并联调谐电路上。与C相耦合的两个调谐电路

的频率分别调谐到比 f_0 高的 f_1 和比 f_0 低的 f_2 处。于是，将正向检波和反向检波的输出加在一起，就得到如图 3.66 所示那样的“S”字形特性的输出。现在假定 FM 输入是未调制的，而且频率为中心频率 f_0。那么，由于输出相互抵消而成为 0。若频率高于中心频率则输出为正，低于中心频率则输出为负。

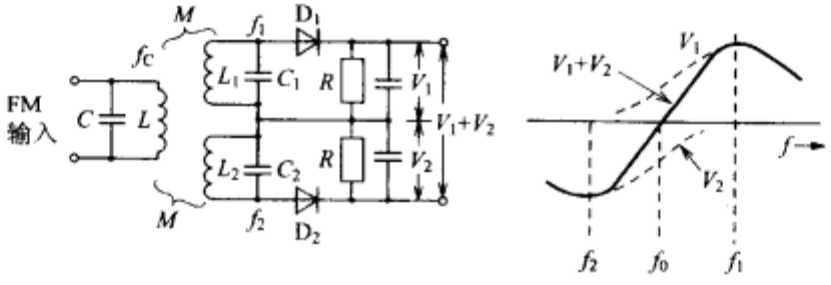


图 3.66 双调谐频率鉴别器

实际上，并不需要特性好、输出大的福斯特-西莱(Foster-Seley)鉴频器和噪声限制电路。而常用的是电路较为简单的比例电路。

图 3.67 给出了比例检波电路。初级和次级谐振频率都设定在 FM 波的中心频率处。如果频率一离开 f_0，那么，加在 D_1 和 D_2 上的电压就出现相位差，其合成电压也就不是 0 而有信号电压输出。

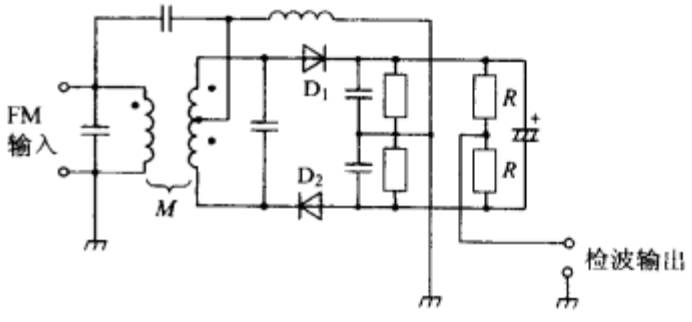


图 3.67 比例检波器

例 题

用示波器观测到的 AM 已调波波形和大小如图 3.68 所示。试求这时的调制度和调制系数。

答 调制度是用 $M=I_s/I_c$ 定义的(见式(3.53))。调制度 $M=I_s/I_c$ 可根据波形用 $(A-B)/(A+B)$ 求得：

调制度 $M=(4-1)/(4+1)=0.6$

调制系数 $=0.6\times100\%=60\%$

[提示：$A=2(I_c+I_s)$，$B=2(I_c-I_s)$。]

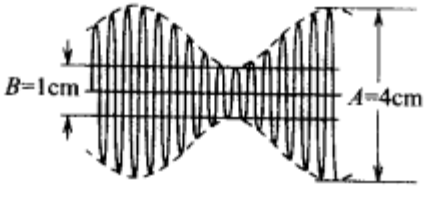


图 3.68 调制系数

21　直流稳压电源

要　点

将交流电变成直流电的电源电路也称为整流器，它是由变压电路、整流电路、平滑电路和稳压电路构成。变压电路用变压器将交流电压变成所需的电压，整流电路用二极管对交流电进行整流，平滑电路由电容器将脉动电流变成直流，稳压电路则使直流输出电压稳定化。

解　释

电源电路

直流稳压电源电路

将交流变成直流的电路称为**电源电路**。对电源电路的要求是效率高、输出电压稳定。电源电路可分成如图3.69所示的五个部分。图3.70给出了直流稳压电源电路的例子。



图3.69　电源电路(直流稳压电源)的方块图

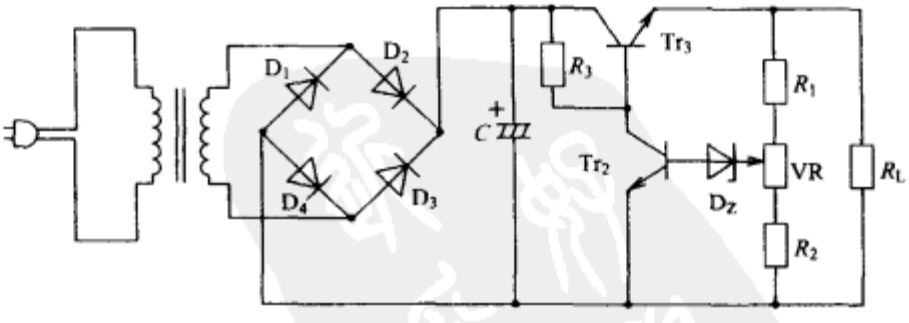


图3.70　直流稳压电源电路

整流电路

用硅二极管将交流变成单方向电流称之为整流。整流有半波整流和全波整流两种。一般多采用效率高的全波整流。

半波整流电路
全波整流电路

图3.71给出了**半波整流电路**，图3.72给出了**全波整流电路**。半波整流只利用了交流的半个周期，所以利用效率

低、纹波大。而全波整流利用了交流的全周期，所以，效率高、纹波小。常用的整流电路有只用两个二极管但变压器要有中间抽头的全波整流电路(见图 3.72)，和使用四个二极管的桥式全波整流电路(见图 3.73)。

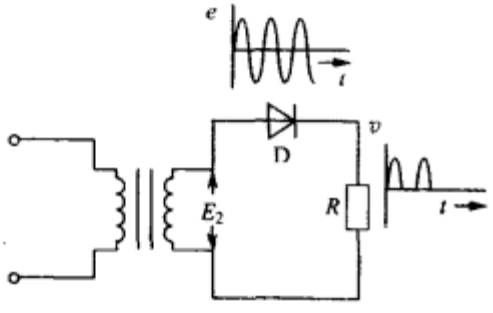


图 3.71 半波整流电路

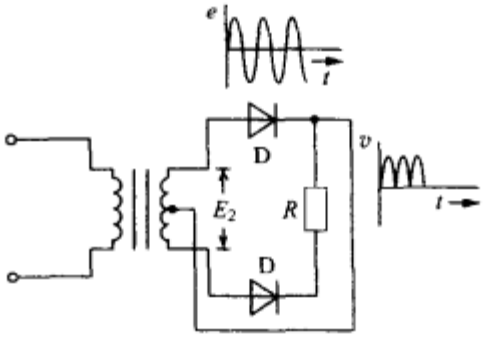


图 3.72 全波整流电路

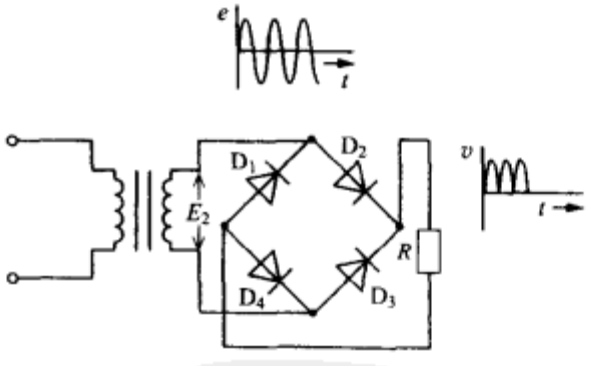


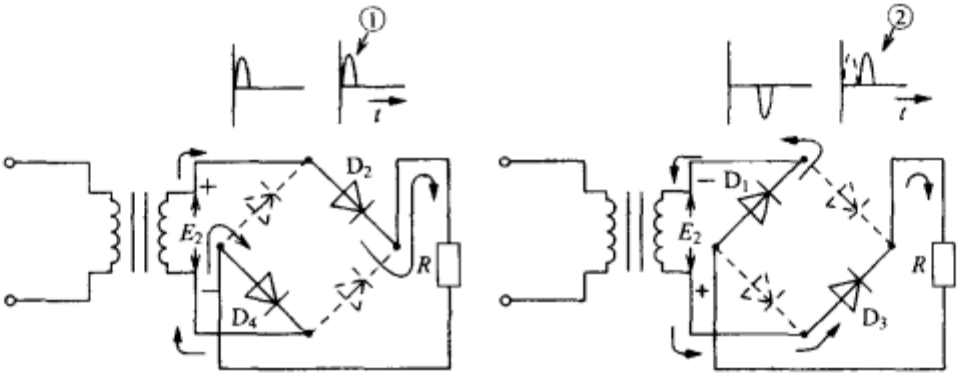
图 3.73 桥式全波整流电路

图 3.74 给出了桥式全波整流电路工作过程的说明。在图 3.74(a)里，E_2 的正半周，D_2、D_4 为导通方向，即可形成 $+\rightarrow D_2\rightarrow R\rightarrow D_4\rightarrow -$ 的闭合电路。这时，负载 R 上流过如图中①所示的正半周电流。在图 3.74(b)里，E_2 的负半周，D_1、D_3 为导通方向，即可形成 $+\rightarrow D_3\rightarrow R\rightarrow D_1\rightarrow -$ 的闭合电路。这时负载 R 上流过如图中②的负半周电流。

平滑电路

平滑电路是将全波整流所得到的脉动电流再利用电容器充放电特性使其成为平滑直流的电路。

如图3.75(a)所示，只经过全波整流的输出电压波形是



(a) 正半周期　　(b) 负半周期

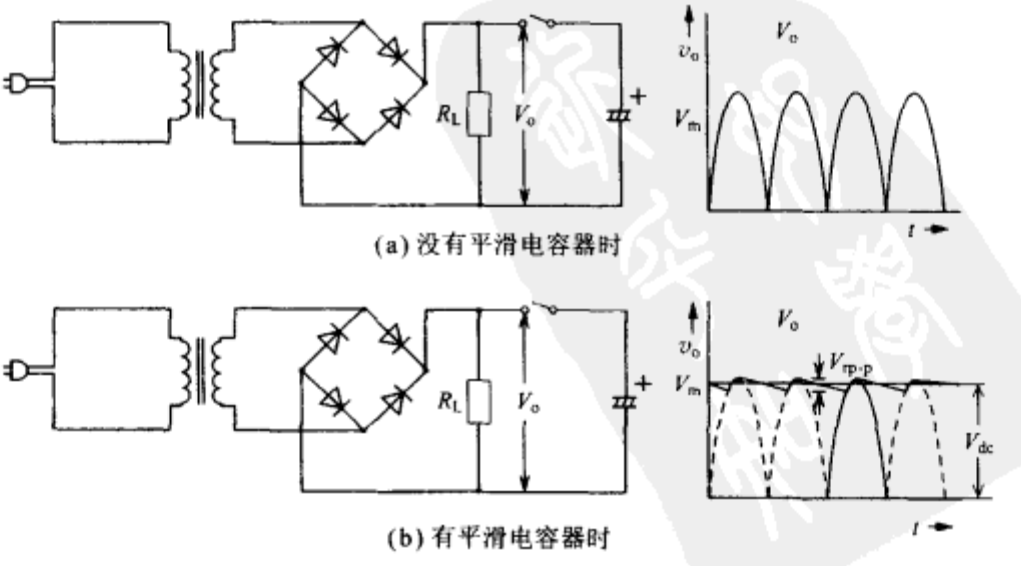
图 3.74　桥式全波整流工作过程

一排交流峰。如果像图 3.75(b)所示那样，将电容器并联到整流后的负载 R_L 上，由于电容器的充放电，交流峰就接近平滑。

由于交流频率很低，只有 50Hz 或 60Hz，所以电容器的容量要大才能使交流峰平滑。这种电容器常使用小型而廉价的铝电解电容器。经过平滑后得到的直流中仍残留有交流成分。表示这种交流成分程度的是**纹波系数** γ，它可用下式表示：

纹波系数

$$\gamma=\frac{V_{rp-p}}{V_{dc}}\times 100\%$$



(a) 没有平滑电容器时

(b) 有平滑电容器时

图 3.75　平滑电路电容器的作用

稳压电路

输出电压变化的主要原因有负载变化、电源电压变化、周围温度变化和湿度变化等。当输出电压因上述原因发生变化时，能将其变化检出，并通过反馈使输出电压保持恒定的即是稳压电路。

串联式稳压电路

1 串联式稳压电路

如图 3.76 所示，输出电压 V_o 因某种原因下降时，因为 V_z 是恒定的，所以晶体管 Tr 的 V_{BE} 上升（$V_{BE}=V_z-V_o$）。其结果，集电极电流增大，V_o 上升，又回到原来的电压。输出电压 V_o 上升时，电路工作的过程与上述过程正好相反。这种电路的缺点是过负载时，晶体管会被烧坏。

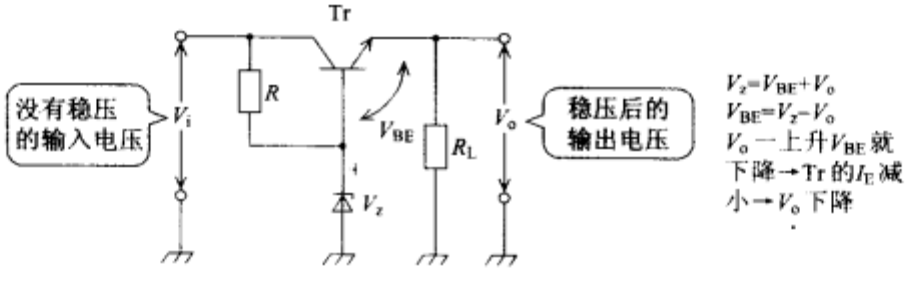


图 3.76　串联式稳压电路

反馈式稳压电路

2 反馈式稳压电路

如图 3.77 所示那样，反馈式稳压电路是把输出电压的一

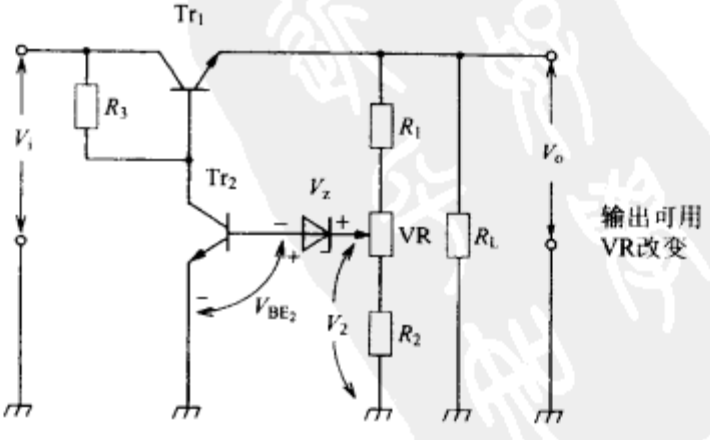


图 3.77　反馈式稳压电路

部分(V_2)与基准电压(V_z)进行比较，并将其差信号($V_{BE2}=V_2-V_z$)反馈到 Tr_1 进行控制的电路。

输出电压因某种原因上升时，V_2 和 V_{BE2} 也就上升。其结果，Tr_2 的集电极电流增加，R_3 上的电压降增大，Tr_1 的基极电位下降，于是，输出电压也下降，最终又回到原来的值。

22 逆变器与整流器

要 点

从交流得到直流用的电力变换装置称为整流器；相反，从直流得到交流的装置则称为逆变器。

尤其是近年来，逆变器技术得到提高，家用电器及工业用电力装置的节能等性能也随之不断进步。

解 释

2001 年，已经实现逆变器化的，国内的空调机为 95％以上，冰箱为 45％以上，洗衣机为 40％以上。

表 3.2 示出了性能可得到提高的电器的例子。

表 3.2 因采用逆变器技术而性能得到提高的例子

逆变器化带来的优点		
荧 光 灯	空 调 机	洗 衣 机
• 无闪烁 • 发光效率高 • 灯亮快 • 调光范围宽 • 无 50Hz/60Hz 能力差	• 节电(高效率) • 低振动、低噪声 • 不降低室温也能除湿 • 无 50/60Hz 能力差	• 节电(高效率) • 低振动、低噪声

逆变器是将直流变换为交流的装置，由于家庭及工厂都供有交流电，所以一般逆变器都有如图 3.78 所示的构成。

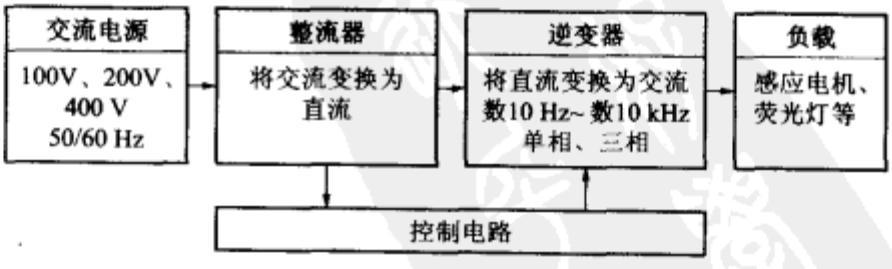


图 3.78 逆变器的基本构成

为什么要将交流变成直流后再变换成交流？这是因为，供给家庭及工厂的交流电在日本东部为 50Hz，在日本西部却为 60Hz，改变此交流的频率及电压可获得表 3.2 所示的优良性能。特别是节电这一点，从保护地球环境的观点看来

也是非常重要的。此外，还有将单相交流直接变换为不同频率的单相交流的双向变频器，以及将三相交流直接变换为另一频率的三相交流的矩阵变频器等。

相关知识

◆ 逆变器空调

逆变器空调，能将频率变换到30～120Hz，起动时，电机以120Hz高速旋转，进行快速制冷或升温，室温稳定后频率则降至30Hz进入低速旋转。靠此来达到节电的目的。不使用逆变器的传统方法，则是电机转速一定，达到所定温度后，关掉电机，温度变化后再开的开关控制方式，其结果是，温度控制粗糙，电机频繁受冲击电流的作用，噪声很大，而且还会对周围的电器带来不良影响。

应用知识

逆变器电路中使用的功率器件

功率器件是指进行功率变换及控制的半导体器件，它包括整流二极管、双极晶体管、晶闸管、GTO、三端双向晶闸管、功率MOSFET、IGBT(Insurated Gate Bipolar Transistor)、IPM(Inteligent Power Module)等，其耐高压化、大电流化、高速高频化及高性能化正在不断进步。逆变器技术的进步，也有赖于这些功率器件的进步。

题外话

冰箱与制冷剂

自从1979年冰箱节能法制订及特定机器指定以来，由于电机及压缩机的效率及隔热材料性能的不断提高，其节能性能确实得到了进步。后来，更由于逆变器控制技术等的开发利用，现在与10年前同容量的产品相比，已节能30%～40%。

但是，冰箱还有一个课题，这就是氟里昂的问题。以前用作制冷剂的是破坏臭氧层的专用氟里昂CFC-12，出于对臭氧层保护的目的，禁止生产使用CFC的冰箱。即使这样，还有原用氟里昂的冰箱的充分回收问题。最近，出现了完全不用氟里昂的冰箱(无氟冰箱)，使用的制冷剂有丁烷、异丁烷、丙烷等，这些制冷剂不破坏臭氧层，对地球变暖的影响也小。但是易汽化而有使制冷剂泄漏从而发生燃烧爆炸的危险，所以要给予充分考虑以确保安全。

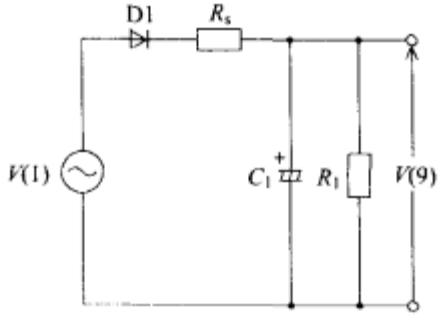
题外话

电子电路的仿真

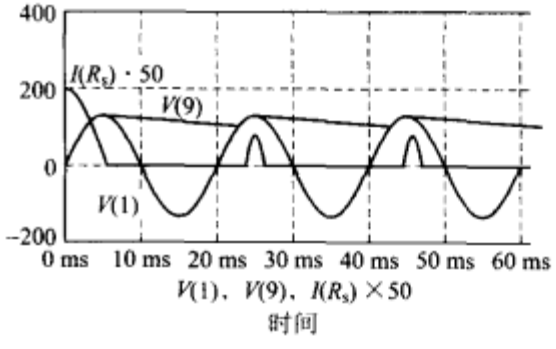
现在可不用进行实验，使用计算机就可能知道电路的状态。这可大大缩短电路设计的时间。其具代表性的是被称为 Spice 的仿真软件。下边介绍一个电路的分析例子。图 3.79(a)是其电路，图 3.79(b)是分析结果。

改变电路元、器件参数值，即可得到其相应结果。电路的各参数值由编程器输入。图 3.79(c)为其输入清单的例子。试比较一下电路和输入计算机的数据以及由此所得到的结果，就可看出它们之间的关系。

Spice 是美国加利福尼亚大学伯克利分校开发的电子电路仿真器。



(a) 电路(半波整流)



(b) 输出波形的结果

```
REC1-RECTIFIER/HALFWAVE ANALYSIS
.TRAN 10US 60MS
.MODEL D1S800 D(Is=0.1p Rs=0.2 CJO=2p Tt=12n Bv=1000 Ibv=0.1p)
V1 1 0 SIN(0 141.4 50)
D1 1 2 D1S800
RS 2 9 1OHM
C1 9 0 100UF
R1 9 0 1KOHM
.probe  ;*ipsp*
.END

A
V(1),V(9),I(RS)*50
```

(c) 输入计算机的电路参数

图 3.79 仿真软件举例

第4章

脉冲数字电路

● 责任编委
扇　浩治
● 执　　笔
扇　浩治 (1～8)
黑木启之 (9～16)
柴崎年彦 (17～26)

人们的生活周围处处可见各种电子机器。像电视机、录像机、传真机、录音电话等，不胜枚举。这么多电子机器的构成技术也就是电子技术，其中，计算机、电视机以及通信等领域的基本电路的构成技术则是脉冲电路和数字电路技术。

本章首先介绍作为脉冲电路基础的多谐振荡器、施密特触发电路及整形电路等，以便理解有关脉冲的基础知识及其工作原理。其次，考虑到与脉冲电路的密切关系，也对作为数字电路基础的二进制数及布尔代数进行了介绍，并讲解了逻辑电路基础以期理解其工作原理。第6章讲述的是信息技术，第7章讲述的是电子控制基础。这两章中若有不明白的地方，可再温习本章讲解的内容。

1　脉冲波

要　点

电子电路中，对持续时间短、间歇变化的电压或电流信号，称为脉冲波。

脉冲波属于非正弦交流信号。数字电路中使用的脉冲波有方波、三角波等。

解　释

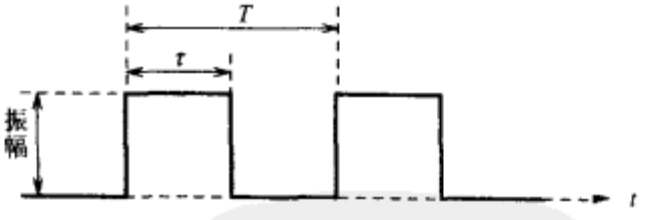
方波

周期脉冲

脉冲波基础

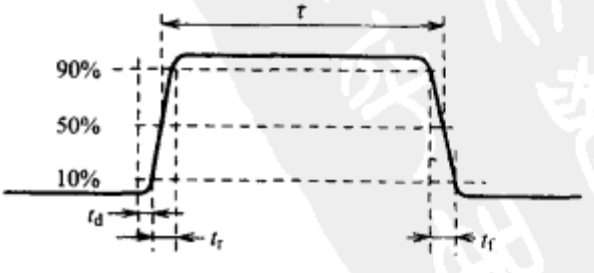
这里以**方波**为例进行说明。如图 4.1(a)所示，此波形为以一定的时间间隔重复的脉冲，因而称为**周期脉冲**。经常使用这种完整理想的波形仅仅是为了处理上的方便，实际波形并非如此。

图 4.1(b)给出了实际脉冲波的例子。其上升沿和下降沿比理想波形平缓，过渡处均带有圆角。这是由于电路中电容和电感的影响所致。



T：重复周期(s)
τ：脉宽(s)

(a) 理想方波



(b) 实际方波

图 4.1　方波脉冲

脉冲波种类

图 4.2(a)～(g)示出了电子电路中经常要处理的脉冲波。其中方波各部分的名称和主要术语定义在表 4.1 中。

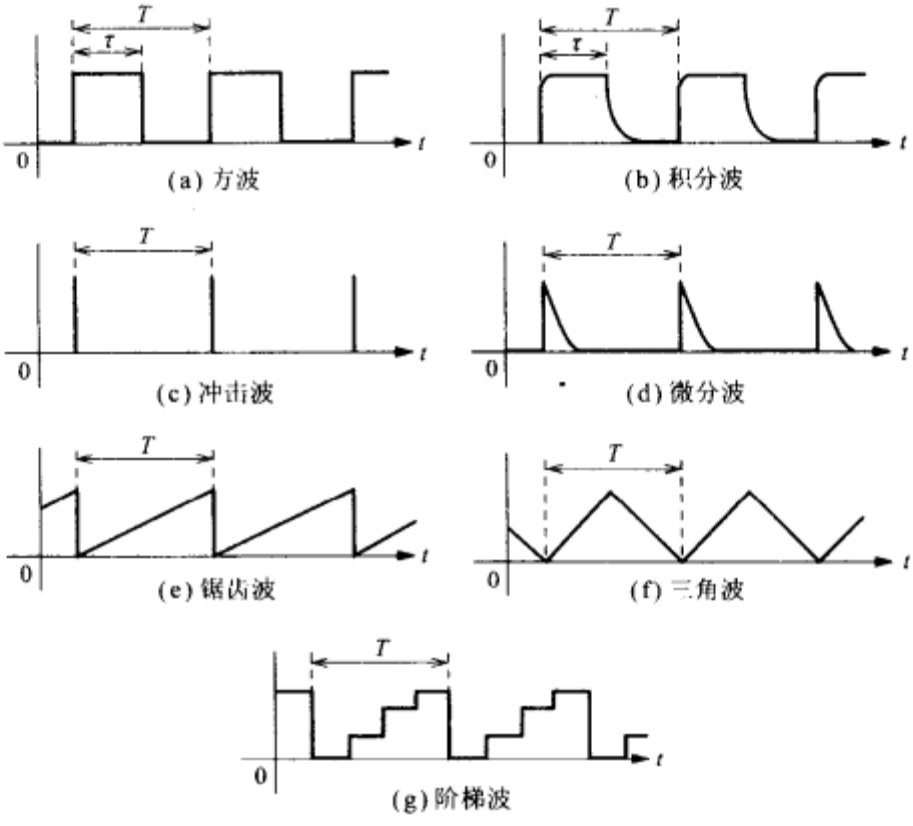


图 4.2 各种脉冲波

表 4.1 方波脉冲各部分的名称和主要术语

名称术语	符号和单位	内容说明
振幅	V(V)，I(A)	用最大值表示
重复周期	T(s)	到下一相同波形出现的时间
重复频率	f(Hz)	重复周期的倒数 $f=1/T$
脉冲宽度	τ(s)	脉冲持续时间
占空比	D	$D=\tau/T$
上升时间	t_r(s)	振幅从脉冲 10%上升到 90%的时间
下降时间	t_f(s)	振幅从脉冲 90%下降到 10%的时间
延迟时间	t_d(s)	振幅从脉冲 0 上升到 10%的时间
存储时间	t_s(s)	输入脉冲终了到输出脉冲达到其振幅的 90%所需的时间

2　开关电路

要　点

在执行开关动作的开关电路中，有使用二极管的，也有使用晶体三极管的。

开关动作，指的是对输入脉冲的响应，因而也称为脉冲响应。

解　释

二极管开关

如图 4.3(a)所示，输入端加正向电压时，电路导通(ON)电流流过。这与开关的闭合状态相同。而如图 4.3(b)所示，输入端加反向电压时，电路断开(OFF)几乎没有电流。这与开关的断开状态相同。

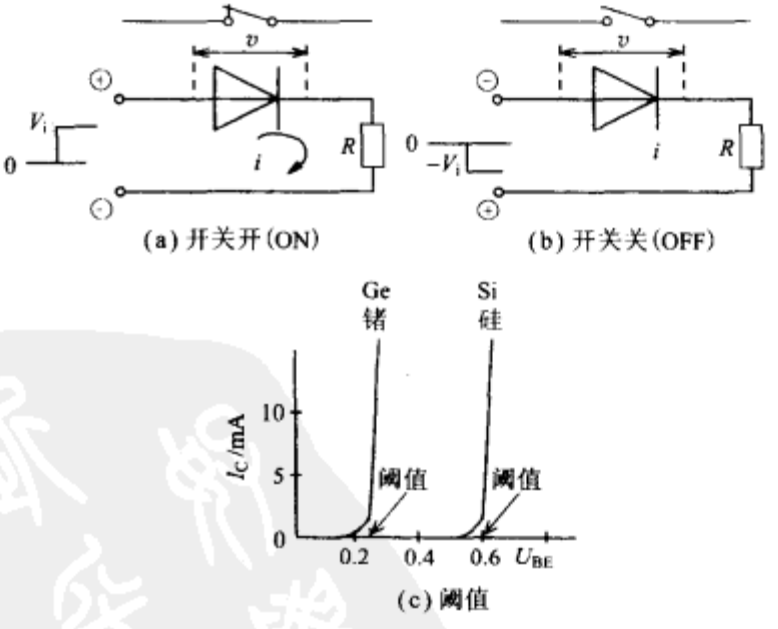


图 4.3　二极管开关及其阈值

正向恢复特性
反向恢复特性
阈值

脉冲电路的问题是，对于输入信号，输出信号响应的快慢。为考察响应速度，应该研究一下二极管的**正向恢复特性**和**反向恢复特性**。二极管的脉冲响应情况显示在图 4.4 和图 4.5 中。这里，V_1 为**阈值**。电压到 V_1 以上时，如图 4.3(c)所

少数载流子存储效应

示，正向电流开始流过。最终管子的压降仍为 V_1。图 4.5 中，t_s 称为存储时间，它是为了将因**少数载流子存储效应**而积累起来的少数载流子释放消散所需要的时间。

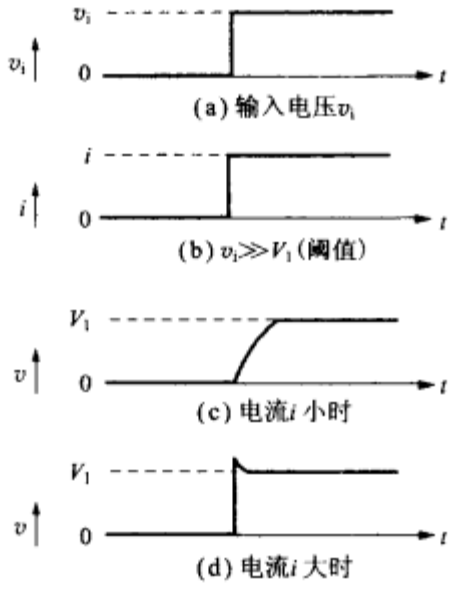


图 4.4 正向脉冲响应

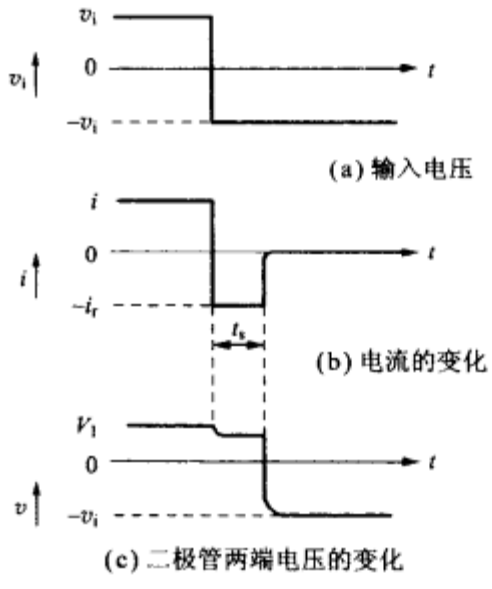


图 4.5 反向脉冲响应

晶体三极管开关

图 4.6 示出的是晶体三极管开关电路的例子及管子的输出特性，图 4.7 则给出了其对于脉冲输入的响应。如图 4.6 所示，输入端施加正电压 V_i 时，基极有电流 I_B 流过，集电极则开始有输出电流，集电极和发射极之间呈导通状态(ON)。

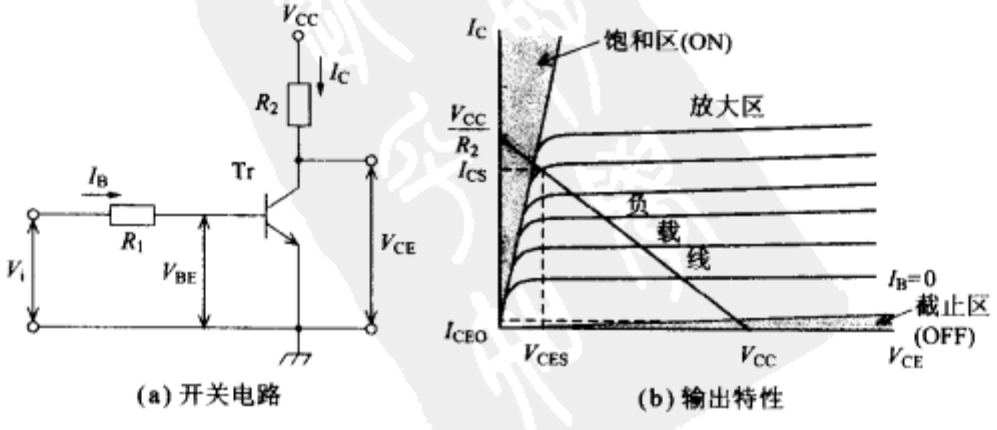


图 4.6 晶体三极管开关

因此，输出电压几乎为零。这与合上开关的状态相同，也叫做输出低电平(L)。这时，与输入电压 V_i 的上升变化相比，集电极的输出电流和输出电压的变化则稍微会延迟出现。这一延迟时间称为**开启时间** t_{on}。

开启时间

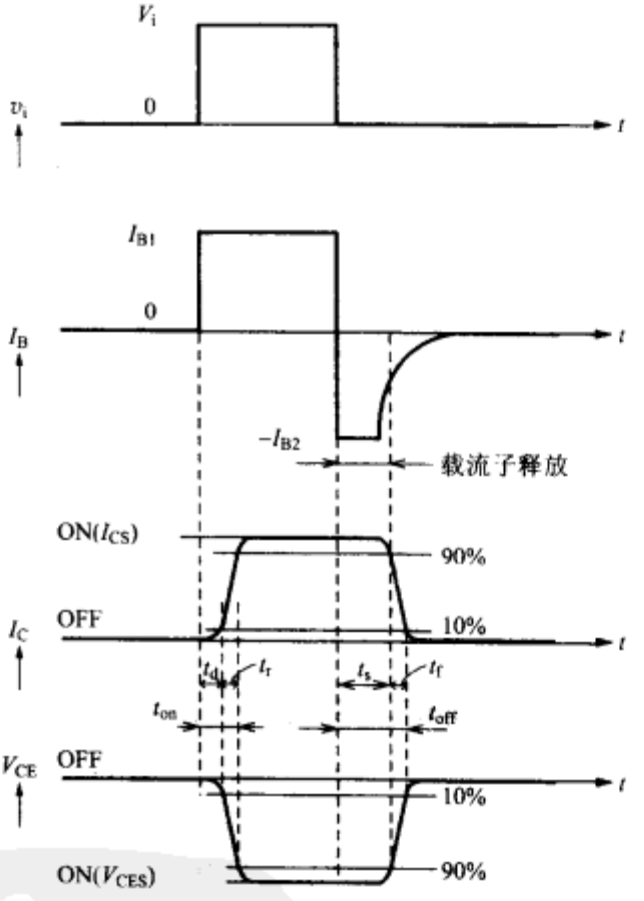


图 4.7　晶体三极管的脉冲响应

输入电压为 0V 时，基极没有电流流过，集电极也没有电流流过，集电极与发射极间呈断开状态(OFF)。这时，集电极输出电压近似为 V_{CC}。这与断开开关的状态相同，也叫做输出高电平(H)。这时，即使去掉输入电压，由于留在基极的载流子的积累作用，也会有反向电流从基极流出。直至此基极电流消失，晶体管一直处于导通状态(ON)，只有当载流子释放结束后，晶体管才渐渐转入断开状态。从输入电压变为零直至晶体管截止的延迟时间称为**关闭时间** t_{off}。

关闭时间

3 多谐振荡器

要 点

多谐振荡器是使用两个反相放大器施以正反馈构成的自激振荡器。它是方波发生器、延时电路、计数器及存储器等的基本组成电路。多谐振荡器按照电路的构成方式不同，可以分为无稳态、单稳态和双稳态三种。

解 释

无稳态多谐振荡器

无稳态多谐振荡器

无稳态多谐振荡器(astable multivibrator)亦称自激多谐振荡器，图 4.8 示出了其基本电路及各部位波形。

电路中，施加电源电压 V_{CC} 后，晶体管 Tr_1 和 Tr_2 反复轮流导通(ON)和截止(OFF)，产生持续振荡。导通或截止状态取决于直流的平衡。对于无外部触发状态保持不变的称为**稳态**，而对于经过一定时间，状态自动从导通变为截止或由截止回到导通的，则称为**暂稳态**。

稳态
暂稳态

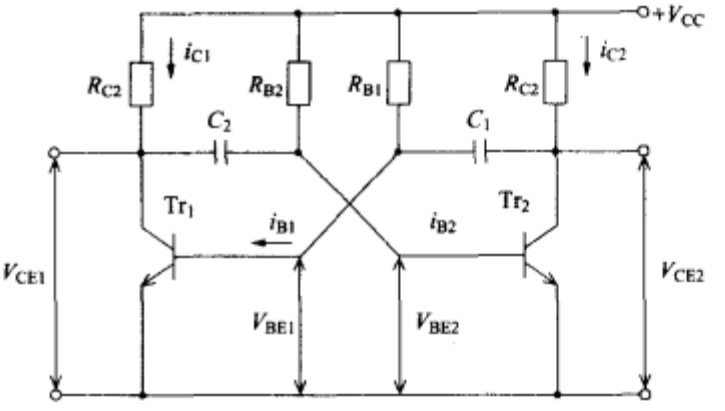
两个放大电路通过电容 C_1、C_2 和电阻 R_{B1}、R_{B2} 实现交流耦合，电路无稳态。两个暂稳态，按照电路时间常数所确定的周期，交互变化(Tr_1、Tr_2 反复轮流 ON 和 OFF)产生持续振荡。振荡的周期 T(s)为

$$T=0.69(R_{B1}C_1+R_{B2}C_2) \tag{4.1}$$

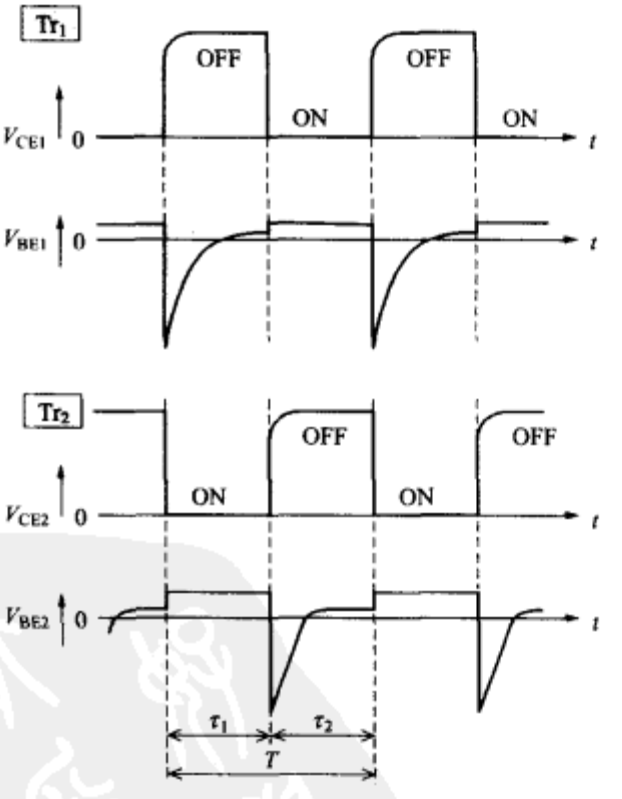
单稳态多谐振荡器

单稳态多谐振荡器(monostable multivibrator)亦称单触发多谐振荡器。图 4.9 示出了其基本电路及各部位的波形。

两个放大电路，一个是通过 C_2、R_3 交流耦合到对方，另一个则仅通过 R_4 直流耦合到对方。Tr_1 管的基极加有负压 $-V_{BB}$ 而截止，Tr_2 管则呈导通状态。从外部施加一负向触发脉冲时，Tr_2 管的基极变负而截止，Tr_1 管则因其基极电压上升而导通。经过一定的时间(由电路的时间常数 $\tau=C_2R_3$ 决定)后，电路自动返回到原来的稳定状态(Tr_1 截止，Tr_2 导通)。



(a) 无稳压多谐振荡器原理电路



(b) 无稳压多谐振荡器的波形

图 4.8　无稳态多谐振荡器

双稳态多谐振荡器

双稳态多谐振荡器

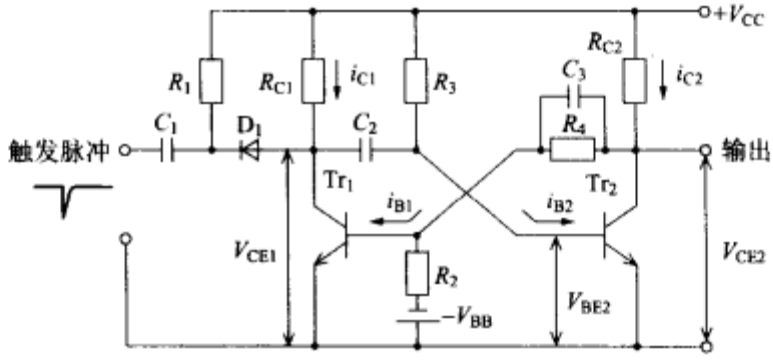
触发电路

双稳态多谐振荡器(bistable multivibrator)可以是集电极和基极交互直流耦合的**触发电路**(flip-flop)型，也可以是

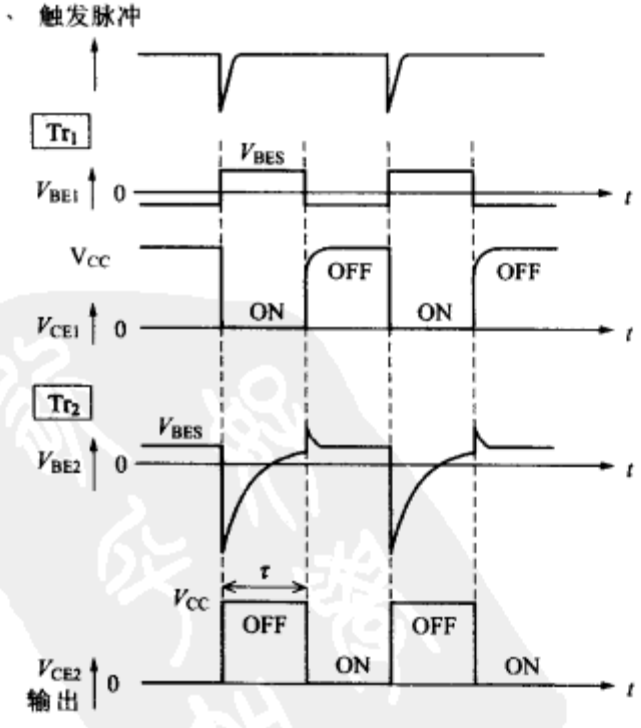
施密特触发电路

发射极耦合的**施密特触发电路**型。这里，以集电极、基极耦合型为例进行说明。图 4.10 示出了其基本电路与波形。

每给一个触发脉冲，Tr_1 管和 Tr_2 管的导通、截止状态交互变化一次。不给触发脉冲时，Tr_1 管和 Tr_2 管的导通、截止状态不变。施密持触发电路及触发器也都同属双稳态多谐振荡器类电路。

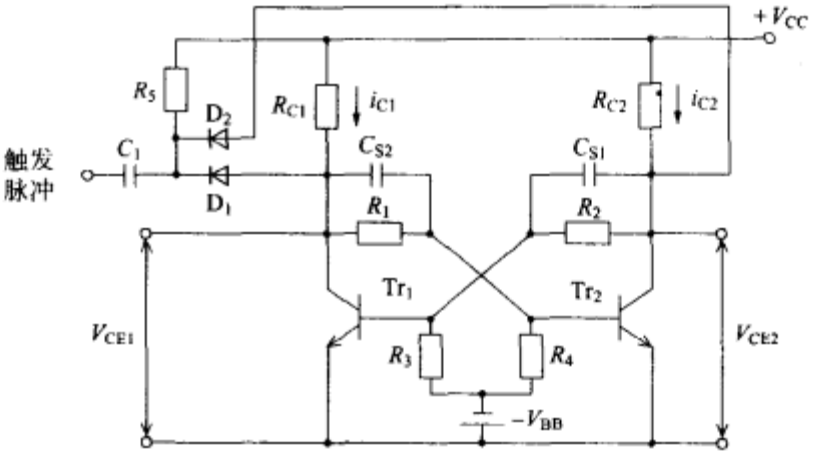


(a) 单稳态多谐振荡器电路(集电极-基极耦合型)

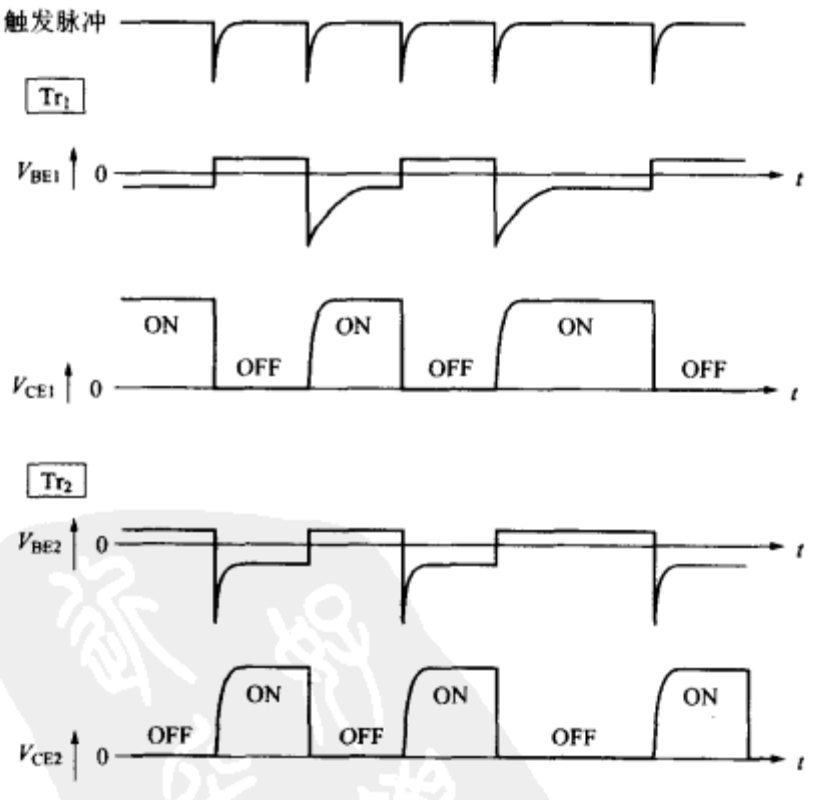


(b) 单稳态多谐振荡器的波形

图 4.9 单稳态多谐振荡器



(a) 双稳态多谐振荡器



(b) 双稳态多谐振荡器的波形

图 4.10　双稳态多谐振荡器

4　施密特触发电路

要　点

施密特触发电路(Schmidt trigger circuit)是双稳态多谐振荡器的一种。其中一只管子的集电极直流耦合到另一只管子的基极，这另一只管子则与对方发射极耦合。

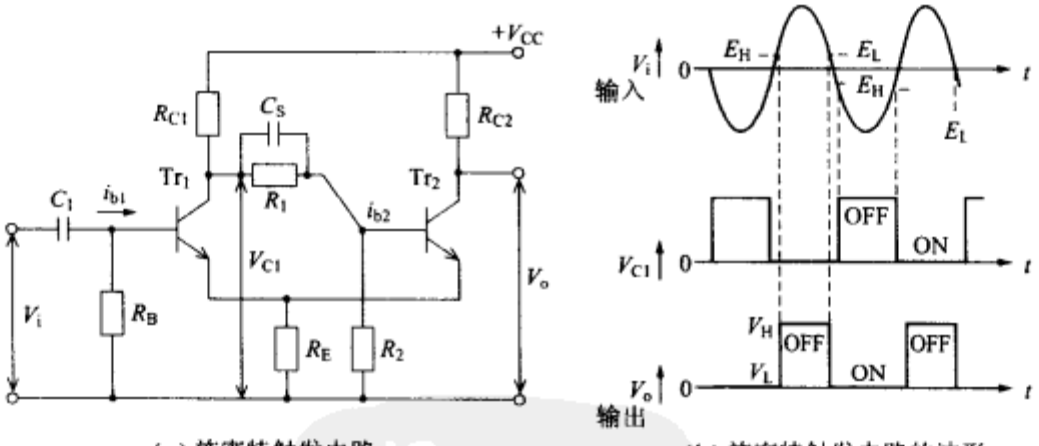
施密特触发电路主要用来将正弦波等非脉冲信号变换为适于数字电路工作的脉冲，以及对将波形畸变了的脉冲进行整形。

解　释

将正弦波变为方波

施密特触发电路

施密特触发电路的基本电路与其波形显示在图 4.11 中。



(a) 施密特触发电路　　(b) 施密特触发电路的波形

图 4.11　施密特触发电路

电路中，当输入信号达到某规定电压值(E_H、E_L)时，其输出电位会立即跳变(V_H，V_L)。因而常用于作振幅比较器，以及将正弦波变换为方波等。从电路输入端输入正弦波，并当输入电压 V_i 超过 E_H 时，电流 I_{b1} 产生，Tr_1 管导通，Tr_2 管截止，输出电压 V_o 为高电平 V_H。当输入电压 V_i 降至 V_L 以下时，电流 I_{b1} 消失，Tr_1 管截止、Tr_2 管导通，输出电压 V_o 为低电平 V_L。此过程重复进行，正弦波即被变换为方波。E_H 和 E_L 是决定管子导通或截止的电压值，因而称为阈值或**门限电平**。

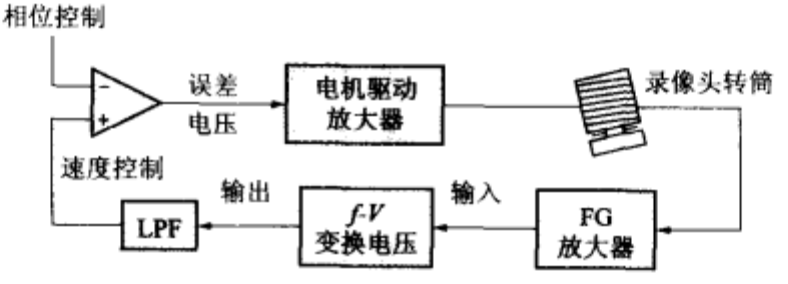
门限电平

应用知识

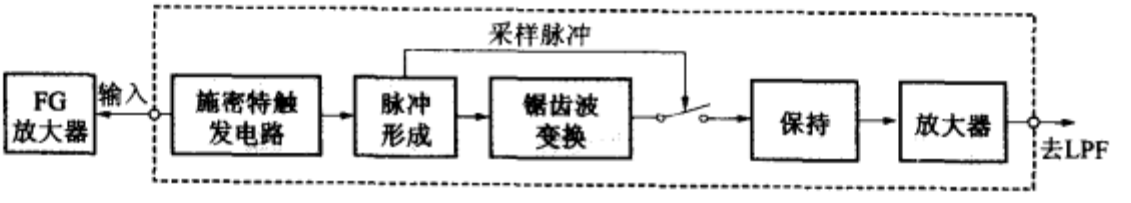
录像机伺服电路中的应用

录像机中有一驱动录像头转筒的电机。将其转速变化造成的频率改变转换成直流电压取出，据此可对其转速进行校正。这样的校正电路称为录像头转筒转速伺服控制电路。在此伺服电路中，施密特触发电路的作用就是作为频率-电压(f-V)变换电路的一部分，将与电机转速成比例的频率信号(FG 输出)变换为方波。

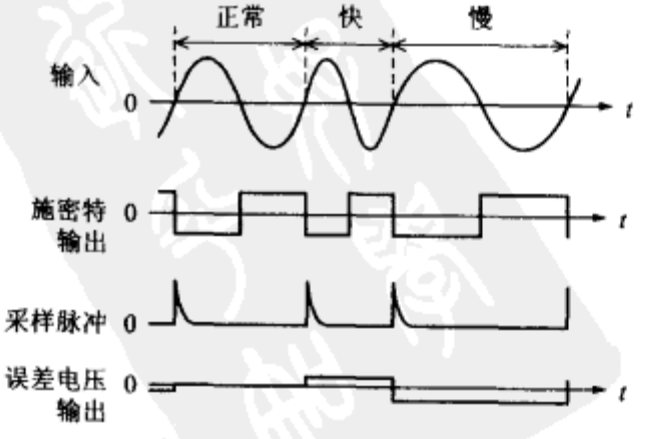
图 4.12 示出了伺服电路的部分框图、f-V 变换电路框图及其波形的输出。



(a) 伺服电路中速度控制部分的构成



(b) f-V 变换电路构成



(c) f-V 变换电路中波形的变化

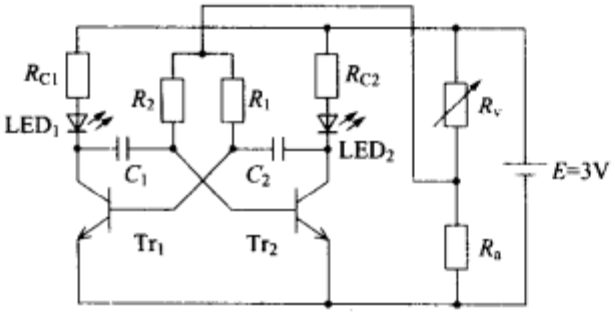
图 4.12　施密特触发电路在伺服电路中的应用

利用无稳态多谐振荡器制作闪光信号灯

利用无稳态多谐振荡器的两部分的交互振动特性，可以制作左右亮、灭的闪光信号灯。其电路和所需元件显示在图4.13中。电路的工作原理与无稳态多谐振荡器相同，Tr_1管和Tr_2管按一定的周期重复导通和截止而产生脉冲。Tr_1管和Tr_2管的集电极处安装有发光二极管，它们将交互产生的脉冲电流变成光，变成一亮一灭的闪光信号。闪光的周期T(s)可按下式求得：

$$T=0.69(C_1R_1+C_2R_2)$$

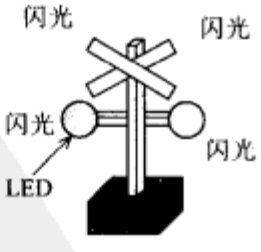
电路中，电阻R_1和R_2通过R_v和R_a与电源相连，R_v为可变电阻器时，可通过其变化改变闪光周期。这种信号灯可用作铁路模型的附件等。



(a) 闪光信号灯电路图例

符　号	名　称	规　格	数量
Tr_1, Tr_2	晶体管	2SC1815	2
LED_1, LED_2	发光二极管	红色	2
R_1, R_2	电阻器	10kΩ 1/8W	2
R_{C1}, R_{C2}	电阻器	150Ω 1/8W	2
R_a	电阻器	430Ω 1/8W	1
R_v	可变电阻器	1kΩ	1
C_1, C_2	电解电容	22μF 6.3V	2
E	干电池	1.5V 单3或4	2
印制电路板			1

其他：盒子、轻质木材(信号灯的支架)、涂料(黑、黄)、光传感器、可变电阻器用旋钮等



(b) 元件表

图4.13　闪光信号灯电路及其元件

5　微分电路与积分电路

要　点

根据信号电压对时间的微分或积分，对信号波形进行变换整理的电路，称为微分电路或积分电路。这种电路是电容 C 和电阻 R 的组合电路。无论是微分电路还是积分电路，都要使用电容，利用电容的充、放电特性进行微分或积分。

解　释

□ 微分电路

微分电路

微分电路(differentiating circuit)指的是将电压变成对时间的微分值后进行输出的电路。其基本电路及输入、输出的变化显示在图 4.14 中。

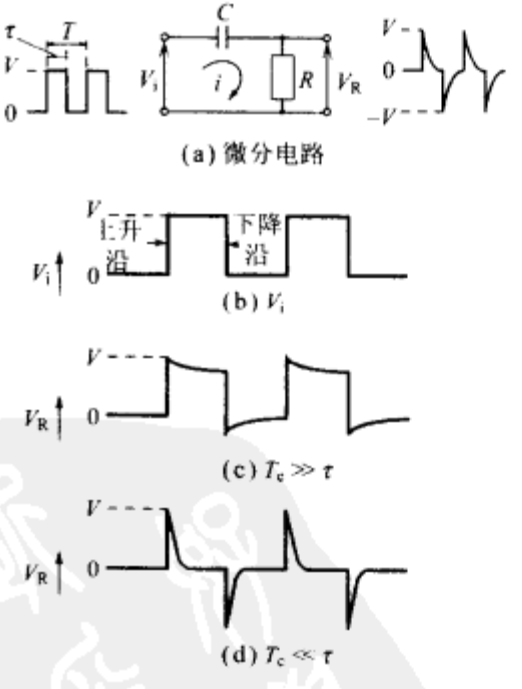


图 4.14　微分电路及其输入、输出波形

将图 4.14(b)所示电压 V_i 作为输入电压加于图 4.14(a)所示的电路上，电容急剧充电。输入电压变为零时，电容器中所充的电荷开始放电，放电电流的方向与图 4.14(a)所标的方向相反，电阻 R 的两端出现负电压。图 4.14(a)所示电路的**时间常数** T_c(s)按式(4.2)计算，即

时间常数

$$T_c = CR(\mathrm{s}) \tag{4.2}$$

时间常数 T_c 与脉冲宽度 τ(s)之间，当 $T_c \gg \tau$ 时，电路输出波形呈现缓慢的曲线变化，而当 $T_c \ll \tau$ 时，输出呈现急剧变化。

电阻 R 上的电压 V_R(V)为

$$V_R = V_i \varepsilon^{-\frac{1}{RC}} \tag{4.3}$$

而当 $T_c \ll \tau$ 时，如图 4.14(d)所示，输出电压 V_R 则为

$$V_R = R \cdot i \approx RC \frac{\mathrm{d}V_i}{\mathrm{d}t} \tag{4.4}$$

输出电压 V_R 近似为输入电压 V_i 对时间的微分与 RC 的乘积(不可能完全微分)。微分电路主要用于提取波形的上升沿或下降沿。

积分电路

积分电路

积分电路(integrating circuit)指的是将输入电压变成对时间的积分值后进行输出的电路。其基本电路及其输入、输出的变化显示在图 4.15 中。由于电阻 R 在电路的输入端，因而当加上输入电压 V_i 时，其输出的上升沿并不像微分电路那样急剧变化，而是电位渐渐上升，给电容充电。输入电

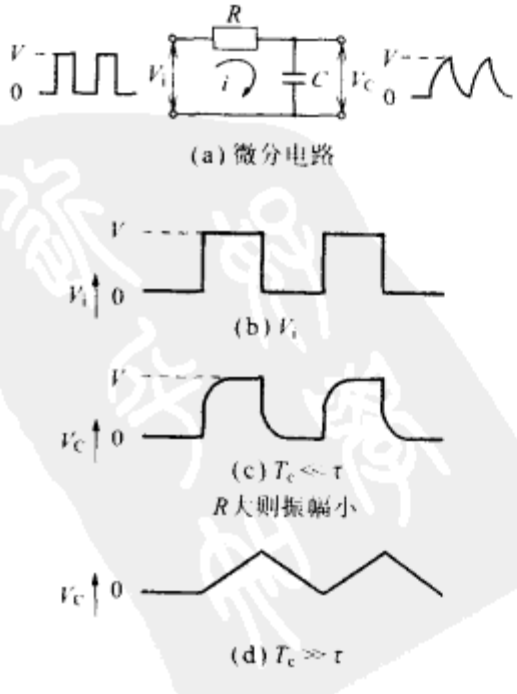


图 4.15 积分电路及其输入、输出波形

压变为 0 时，电容器开始放电，输出电压 V_c 开始缓慢下降。这一充、放电过程会重复进行。

时间常数 T_c 和脉冲宽度 τ 之间，如图 4.15(b)、(c)、(d)所示，当 $T_c \ll \tau$ 时，输出波形呈方波变化，而当 $T_c \gg \tau$ 时，输出则呈三角波变化。输出电压 V_0(V)为

$$V_c = V_i(1-\varepsilon^{-\frac{1}{RC}}) \tag{4.5}$$

输出为图 4.15(d)的三角波时，输出电压 V_c 可写成

$$V_c \approx \frac{1}{RC}\int_0^t V_i \mathrm{d}t \tag{4.6}$$

输出电压 V_c 近似等于输入电压 V_i 对时间的积分与 $1/(RC)$ 的乘积(不可能完全积分)。

例　题

图 4.14(a)所示的微分电路中，$T_c \ll \tau$ 的情况下，如图 4.14(d)所示，输入电压 V_i 下降时输出电压 V_R 变成负脉冲，试述其变化的理由。

答　假设产生输入电压的电源内阻为 0，无脉冲期间就相当于输入端短路，电容器上所充的电荷开始放电。$T_c \ll \tau$ 时，放电很急剧，V_i 下降前 V_R 已经为 0，V_i 下降时，输出端则会产生负脉冲。

6　各种各样的整形电路

要　点

脉冲信号通过各种电路时，会因为波形畸变失真而引起误动作。因而需要采用整形电路对信号波形进行整形或者重新进行变化。整形电路亦称波形变化操作电路。这里，就截取、双向限幅、削波、钳位等电路进行说明。

解　释

削波电路(提取波形的顶部)

信号相对于某基准电平的上部或下部需要提取或削去时，使用的电路就是**削波电路**(clipper)。

削波电路

截底

图 4.16(a)所示的**截底**，提取的是波形的顶部。输入信号 v_i 低于电池电压 5V 时，二极管导通，输出电压保持在 5V。v_i 超过 5V 的部分，由于二极管截止，信号的顶部可以被取出。

截顶

图 4.16(b)所示的**截顶**，提取的则是包含信号中心部分在内的某电平以下的信号波形。

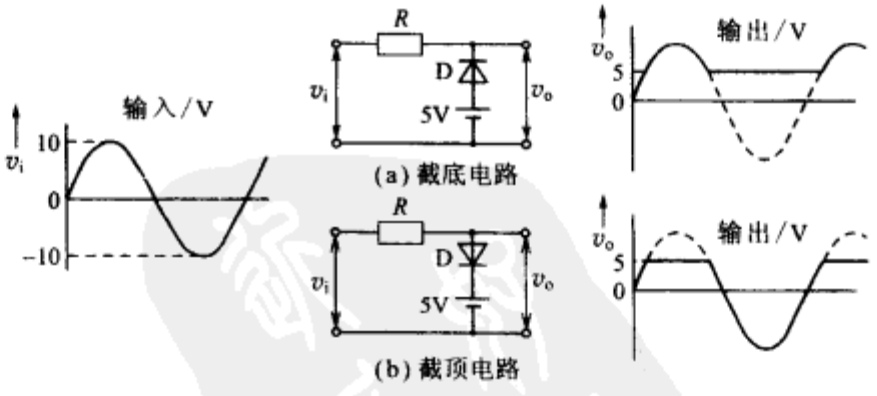


图 4.16　削波电路

双向限幅电路(提取波形的中心部分)

图 4.17 所示为限幅电路，削去了输入信号的上部和下部，而将剩余的部分提取出来。输出电压的正、负极限值的大小，取决于加在二极管上的直流电压值。图中，D_2 下的电池将信号的最大值限制在 5V，而 D_1 下的电池则将信号的

振幅限制电路

最小值限制在－5V。也称为**振幅限制电路**。

截取电路(切取波形的一部分)

截取电路是限制电路的一种应用，用来提取输入信号中的一部分。图 4.18 示出了截取电路及其输入、输出波形。图中切取的是信号中 5～8V 间的部分。

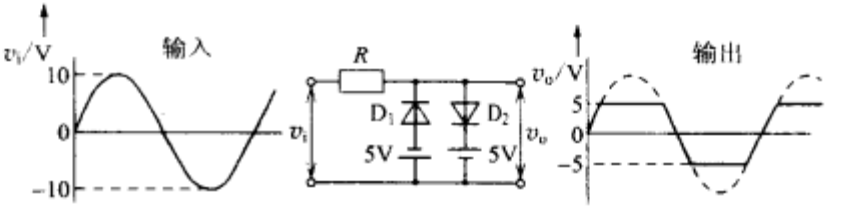


图 4.17　双向限幅电路

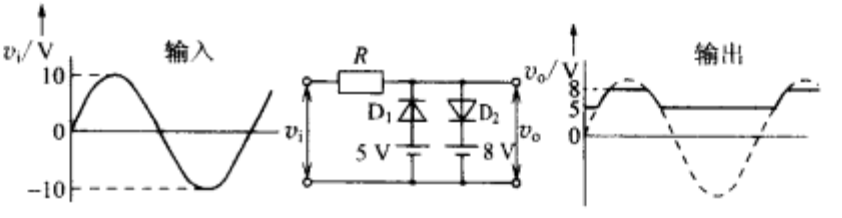


图 4.18　截取电路

钳位电路(加一直流电平在信号波形上)

钳位电路

将一直流电压加于某信号电压上，仅使信号整体抬高或下降的电路，称为**钳位电路**。图 4.19(a)示出了该电路及其输入、输出波形。其中图 4.19(a)示出的是提高直流电平的**正钳位电路**，图 4.19(b)示出的是降低直流电平的**负钳位电路**。

正钳位电路

负钳位电路

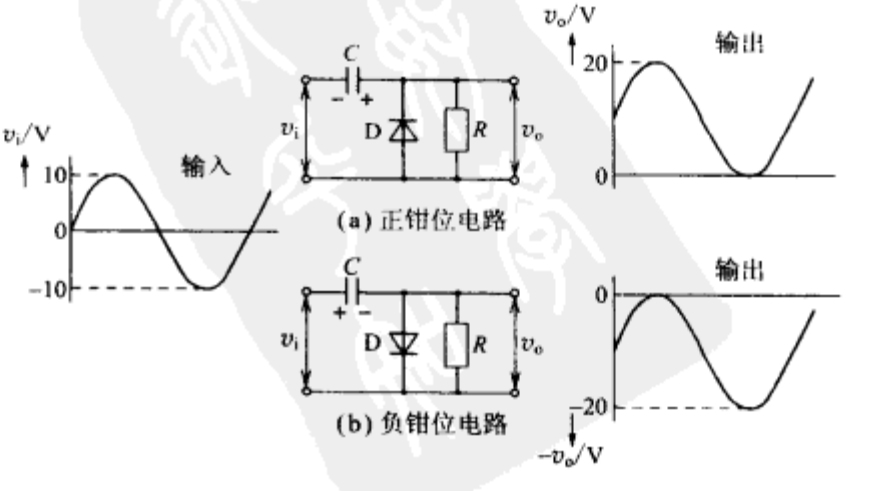


图 4.19　钳位电路

7　锯齿波的产生

要　点

锯齿波是脉冲波的一种，因其波形像锯条的齿而得名。对周期确定的脉冲进行积分，即可产生锯齿波。它常用于电视机、示波器等的阴极射线管的扫描等。锯齿波可用米勒积分电路或自举电路产生。

解　释

锯齿波

锯齿波发生电路

图 4.20 给出了**锯齿波**的发生原理及其输出波形。图中的电路是一积分电路。打开开关时，电容 C 上的充电电压 v_c 渐渐增大，其变化情况取决于电路的时间常数。此时的充电电压为

$$v_c = V(1-e^{-\frac{t}{CR}}) \tag{4.7}$$

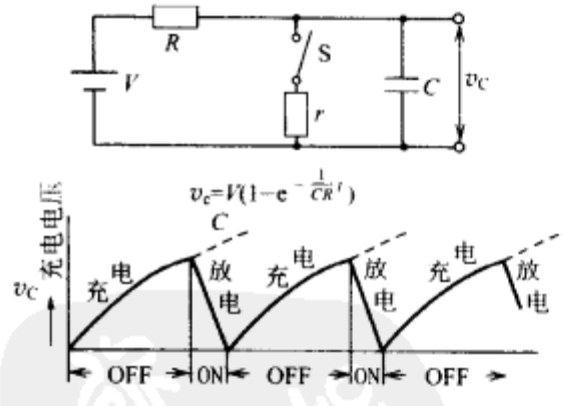


图 4.20　锯齿波的发生原理

合上开关时，电容 C 放电。此过程重复进行即可获得锯齿波。将此开关代之以晶体三极管，即得到如图 4.21 所

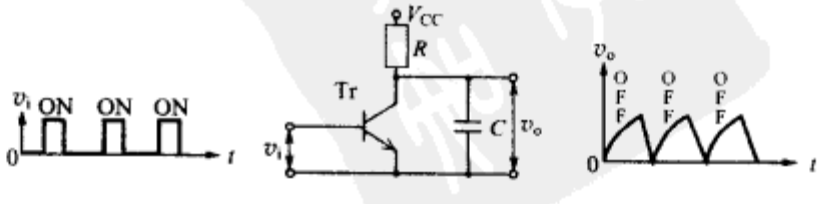


图 4.21　锯齿波发生电路

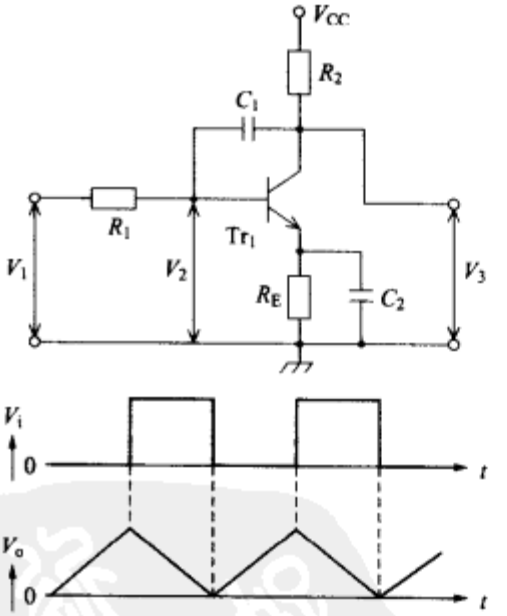
示的电路。该电路中，三极管的基极电压为正时，管子导通。据此，当给电路输入周期确定的脉冲波时，即可在输出端产生锯齿波。

米勒积分电路

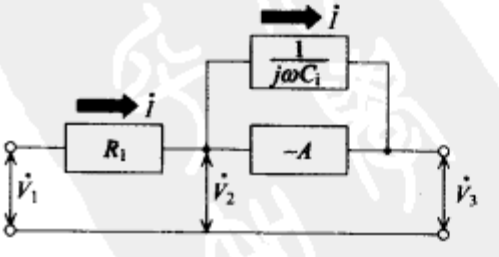
晶体管开关电路中，为改善其线性，可以增大 CR，但其缺点是输出电压太小。能够克服此缺点的电路是**米勒积分电路**。

米勒积分电路

图 4.22 给出了典型的米勒积分电路及其原理说明。电路的输入阻抗非常大时，流经 R_1 和 $1/j\omega C$ 的电流是近似相同的。此时 $\dot{V}_3$ 为



(a) 米勒积分电路及其输入输出波形



(b) 米勒积分电路的构成

图 4.22　米勒积分电路及其输入/输出波形

$$\dot{V}_3=\frac{A}{1+(1+A)j\omega C_1R_1}\dot{V}_1 \tag{4.8}$$

而对一般的积分电路(见图 4.23)输入 $\dot{V}_i$ 时,其输出电压仅为

$$\dot{V}_o=\frac{\dot{V}_i}{1+j\omega C_1R_1} \tag{4.9}$$

比较式(4.8)与式(4.9),可知时间常数增加至(1+A)倍。称为**米勒效应**。另外,输出电压约增大至 A 倍,从而可以获得线性好、幅值高的锯齿波。

米勒效应

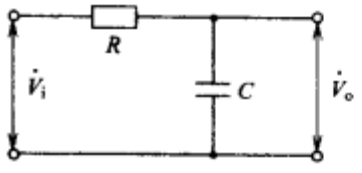


图 4.23　积分电路

自举电路

自举电路

图 4.24 给出了典型的**自举电路**及其原理说明。Tr_1 管作为开关使用,Tr_2 管构成射极跟随放大电路。设射极跟随电路的放大倍数为 G,则自举电路的时间常数 T_b 为:

$$T_b=\frac{CR}{1-G} \tag{4.10}$$

因 G 近似为 1,所以

$$T_b\approx\infty$$

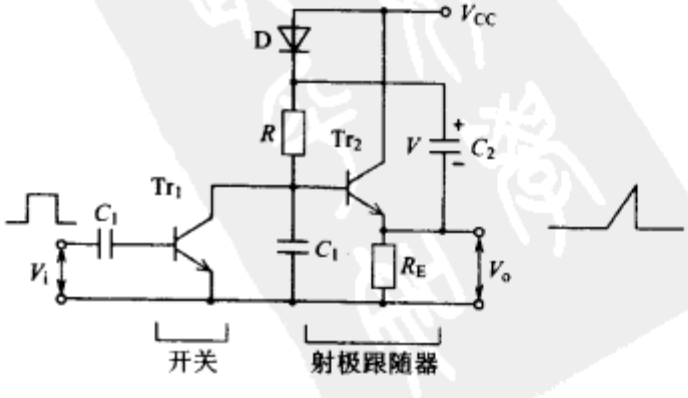


图 4.24　自举电路

8　脉冲放大电路

要　点

脉冲放大电路要处理的是急剧变化的脉冲，因而其构成与晶体管开关电路相同。根据输出特性中工作点在负载线上位置的不同，可以分为饱和型脉冲放大电路和非饱和型脉冲放大电路。饱和型电路中集电极电流在饱和区和截止区间变化，而非饱和型电路中集电极电流则在放大区和截止区间变化。

解　释

□ 饱和型脉冲放大电路

饱和型脉冲放大电路

图 4.25 给出了**饱和型脉冲放大电路**的基本电路及其输出特性。如图 4.25(b)所示，在输出特性图上画出负载线，即可求得工作点。该电路设计中，R_B 选得较小，因而当管子导通时，工作点即进入饱和区。此时，集电极的电压损失也小，可以获得较大的输出电压，电路也简单。其缺点是开关动作较慢。为此，可采用在 R_B 两端并入一加速电容 C_S，迫使基极电流快速流过等措施。

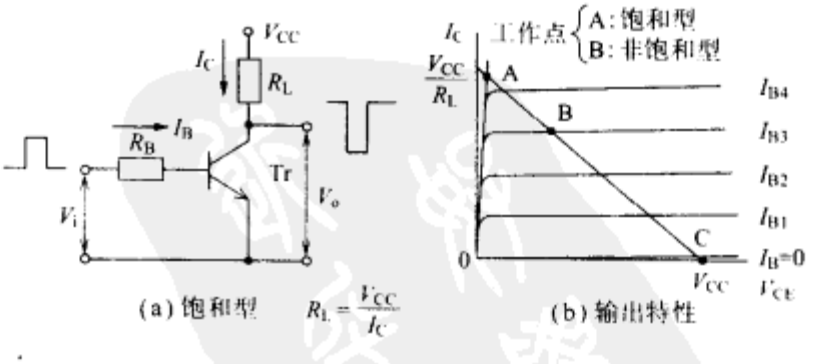


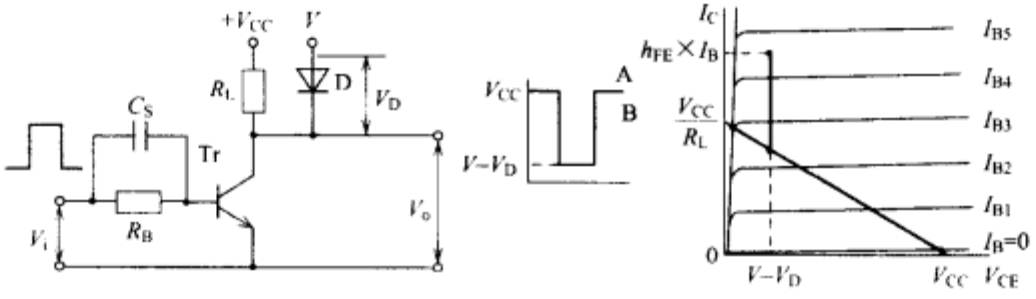
图 4.25　饱和型脉冲放大电路及其输出特性

□ 非饱和型脉冲放大电路

非饱和型脉冲放大电路

图 4.26 给出了**非饱和型脉冲放大电路**的基本电路及其输出特性。该电路的输出端通过二极管接在一低于 V_{CC} 的电压 V 上。因而，管子导通时集电极的电压 $V_C=V_{CC}-$

$I_C R_L$，而如果 $V-V_D>V_C$ 则二极管导通，输出电压保持为定值 $V-V_D$ 而不再下降。这里，V_D 是二极管导通时的管压降。此时，只要二极管处于导通状态，集电极的电流一直可以增加到 $h_{FE} I_B$，其负载线如图 4.26(b)所示呈折线。



(a) 非饱和型　　(b) 输出特性

图 4.26　非饱和型脉冲放大电路及其输出特性

应用知识

LED 驱动器中的应用

显示数字或文字时经常使用 LED，LED 的正常工作电流为 10～20mA。对此，脉冲放大电路可发挥其特长。

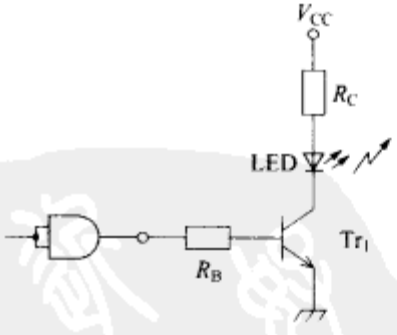


图 4.27　饱和型驱动举例

图 4.27 是使用饱和型脉冲放大电路的实例。将 LED 串接在集电极的电路即是用来驱动电流容量小的数字器件的。图 4.28 是 7 段 LED 显示电路的例子。TC74HC4511P 芯片是集成的 LED 驱动电路。LED 驱动器和 LED 之间的电阻为限流电阻，通常在 150Ω～1kΩ 的范围内选取。

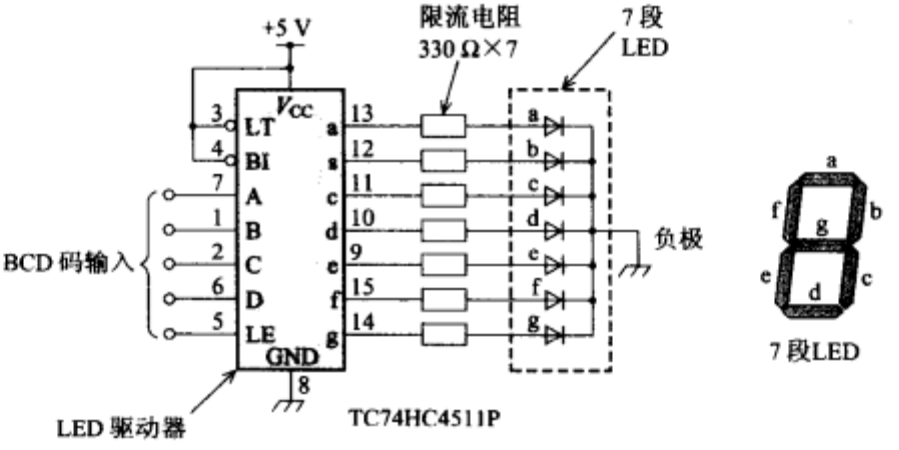


图 4.28　7 段 LED 驱动举例

9　用1和0表示数字

要　点

数字电路处理的是0和1的两值信号，要用这样的信号表示数值，就需要与十进制数不同的特殊的数值表示方法。仅仅使用0和1来表示数值的数制体系，称为二进制数。

解　释

用二进制数表示数字

人们通常使用的十进制数，是用0～9来表示数字。例如，用十进制数表示的“413”意味着

$$413 = 4\times100+1\times10+3$$
$$= 4\times10^2+1\times10^1+3\times10^0$$

权重

它们的每一位分别具有10^2、10^1等不同的**权重**。这时的权重是十进制，因而用10的乘幂来表示。

二进制数

用只有1和0的**二进制数**进行类似的数值表示时，各位的权重则是2的乘幂。

例如，用二进制数表示“413”时，与上述表示法类似，可以用2的乘幂表示如下：

$$413 = 1\times2^8+1\times2^7+0\times2^6+0\times2^5+1\times2^4$$
$$+1\times2^3+1\times2^2+0\times2^1+1\times2^0$$

如图4.29所示，各位(0或1)按权重由大到小的顺序从左向右排列即成为二进制数。由此可见，为表示同样的数值，二进制数的位数约是十进制数位数的3倍。

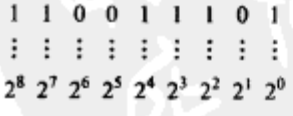


图4.29　“413”的二进制表示及各位的权重

bit和byte

bit

字节

二进制数的一位，叫做**bit**。二进制数的8位，即8bit，叫做一个**字节**(byte)(见图4.30)。

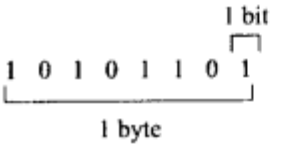


图 4.30　bit 和 byte

□ 二进制数和十进制数的区别方法

写着一个数“1101”，它是二进制的 1101，还是十进制的一千一百零一，有时很难判断。因此，为区别起见，写的时候，给数值加括号并加注。如十进制数时写成$(13)_{10}$，二进制数时写成$(1101)_2$。

相关知识

◆ 数字电路和二进制数

下面来考察一下数字电路中一个数值的十进制表达和二进制表达是如何进行的。如图 4.31 所示，假定用灯亮和灯灭来表示数值。用十进制表示一个

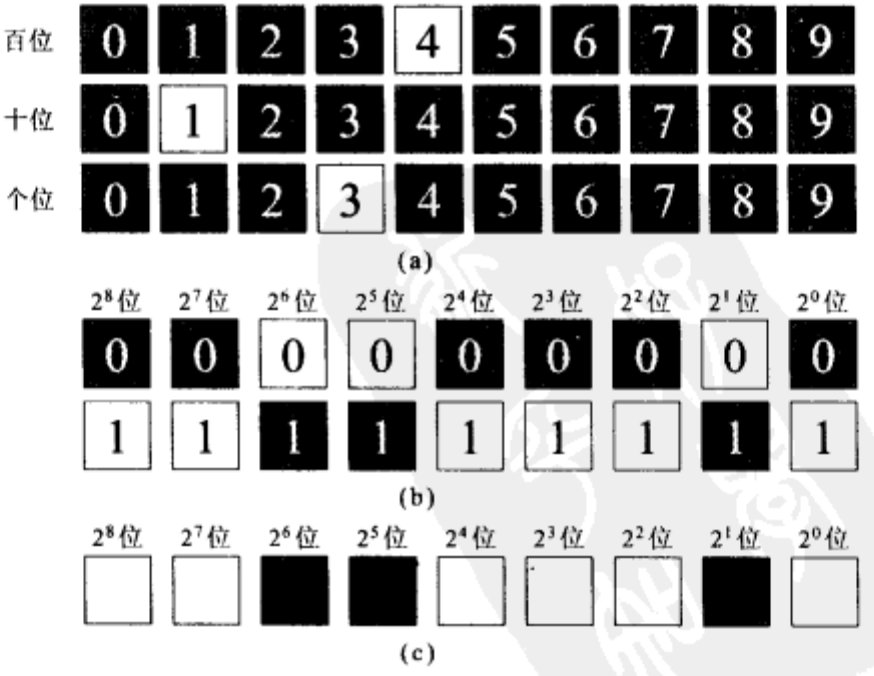


图 4.31　十进制和二进制显示元件数的不同

3位数时，因为是十进制，有时要表示的各位数字又相同，这就必须要有30个灯[见图4.31(a)]。而采用二进制时，则只需要18个[见图4.31(b)]。而且，如果规定用灯灭表示二进制的0，用灯亮表示二进制的1，则只需要9个灯(显示元件)就够了[见图4.31(c)]。可见，在由数字电路所制造的计算机中，处理数据时，使用二进制可比使用十进制需要的元件少，因而非常经济。

10　二进制数和十进制数间的变换

要　点

假定 d_i 是二进制数的一位，$d_k d_{k-1} \cdots d_1 d_0$ 是一个二进制数，进行二-十进制变换时，可用下式求得其十进制数 n。

$$n = 2^k \times d_k + 2^{k-1} \times d_{k-1} + \cdots + 2^1 \times d_1 + 2^0 \times d_0$$

从十进制变为二进制时，使其值等于 n 求各 d_i。

从二进制变为十进制时，将各位 d_i 代入上式求 n。

解　释

从十进制向二进制的变换

将十进制数变为二进制数，即求上述公式右边的各位 d_i，使用图 4.32 所示方法是比较简便的。

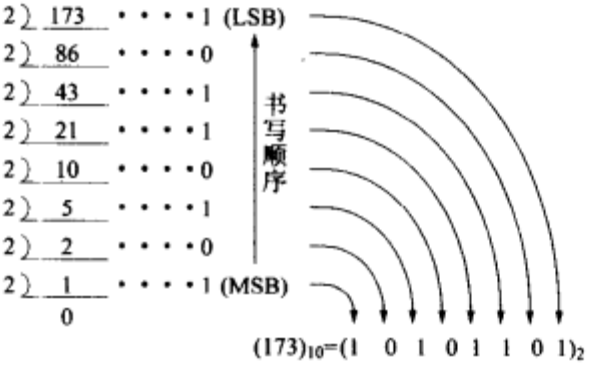


图 4.32　从十进制向二进制变换的方法

首先，用 2 去除要变换的十进制数，商写在下边，余数写在旁边。接着再用 2 去除所得的商，其商写在下边，余数写在旁边。重复此过程直至商为 0。

然后，将写在旁边的最下面的余数作为最高位，将最上面的余数作为最低位，按顺序排列即为变换结果。

MSB 和 LSB

MSB
LSB

如图 4.32 所示用二进制表示数值时，其最高位称为 **MSB**(Most Significant Bit)，最低位称为 **LSB**(Least Significant Bit)。

从二进制向十进制的变换

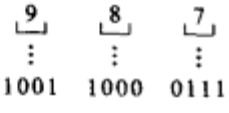
将二进制数变为十进制数时，将各位与其权重相乘，再全部加在一起即可。例如，要将图 4.32 中变得的二进制数再变回为十进制数时，其计算如下：

$$\begin{aligned}(10101101)_2 &= 2^7\times1+2^6\times0+2^5\times1+2^4\times0+2^3\times1\\&\quad+2^2\times1+2^1\times0+2^0\times1\\&=(173)_{10}\end{aligned}$$

相关知识

◆ 二进制化的十进制法

二进制数是计算机及数字电路中不能缺少的数值表示方法，但是二进制和十进制间的变换则稍显麻烦。为此，即产生了将十进制数的各位分别变换成四位二进制数的数值表示方法。此法称为二进制化的十进制法（BCD：Binary Coded Decimal）。图 4.33 给出了表示实例。用此法进行二进制和十进制的变换很简单，但是加减计算时的进位和借位则比较复杂。而且变换后的位数比通常的二进制数的位数还要多。



$(987)_{10}=(100110000111)_{BCD}$

图 4.33　十进制数的 BCD 码表示法

例 题

将十进制数 63 变为二进制数。

解说　将十进制数变为二进制数时，使用图 4.32 所示的方法。其计算过程显示在图 4.34 中。

答　$(111111)_2$



图 4.34　将 $(63)_{10}$ 从十进制数变为二进制数

11　二进制和十六进制间的变换

要　点

从二进制向十六进制变换时，只需将二进制数从最低位开始每四位断开，即可方便地将其变为十六进制。从十六进制向二进制变换时，将十六进制数的每位都变为二进制的四位即可。

解　释

□ 二进制和十六进制的关系

十六进制是指将十进制0～15都可以作成一位的数值体系。由于10～15不能原封不动地表示成一位，因而采用下述的表示

10→A　11→B　12→C　13→D　14→E　15→F

二进制四位可以表示0～15。即二进制四位对应十六进制一位。而且，按十六进制表示，可以减少按二进制表示所引起的很多的位数。

□ 从二进制向十六进制的变换

从二进制向十六进制变换时，如图4.35所示，首先将二进制数从最低位开始每四位断开，然后将每段二进制四位变换为十六进制一位。不改变顺序将其连写在一起，即为变换结果。

□ 从十六进制向二进制的变换

将十六进制数变换为二进制数时，如图4.36所示，要将十六进制数的每位变换为二进制数。变换后的二进制数不足四位的(十六进制数中的7以下)，数前用0补足四位。然后不改顺序将其连写在一起，即为变换结果。

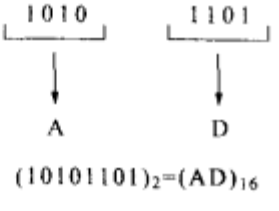


图4.35　从二进制向十六进制的变换

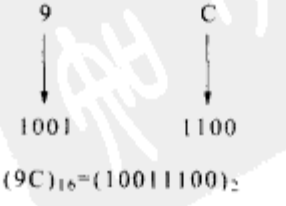


图4.36　从十六进制向二进制的变换

相关知识

◆ 十六进制数的表示方法

为表示为十六进制数，有采用$(9D)_{16}$方式的，但一般都表示成 9DH（或 9Dh）那样，在数值的后边带个 H（或 h）。H 是 Hexadecimal（意为十六进制）的字头。存储器的地址多用带 H 的十六进制数表示（最近像 0x9D 这样用加字头"0x"的方法来表示十六进制数的越来越多）。

◆ 十进制和十六进制的变换

从十进制变换到十六进制，如图 4.37 所示，将要变换的十进制数用 16 去除，余数写在旁边，商写在下边。对所得的商进行同样的操作。重复此过程直至商为 0。然后，将最下边的余数作为最高位，最上边的余数作为最低位，连写在一起即为变换结果。

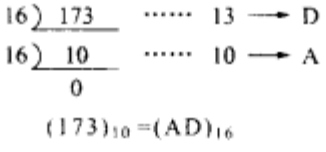


图 4.37　从十进制向十六进制的变换

将十六进制数变为十进制数时，将其各位与其权重相乘即可。若将图 4.37 中得到的十六进制数再变为十进制数时，其计算如下。

$$(AD)_{16}=16^1\times10+16^0\times13=(173)_{10}$$

◆ 为什么将二进制数四位断开就可以变为十六进制数

这一变换有其理论背景。如图 4.38 所示，A 为 8 位二进制数（d_i 为二进制的一位），B 为与 A 同值的十六进制数（h_i 为十六进制的一位），其中①的部分与 h_1 对应，②的部分与 h_0 对应。①和②就都是二进制的 4 位，将其变换成十六进制的一位，即可得到十六进制数。

$$\begin{aligned}
&(d_7\,d_6\,d_5\,d_4\,d_3\,d_2\,d_1\,d_0)_2 \text{ ——— A}\\
&=d_7\times2^7+d_6\times2^6+d_5\times2^5+d_4\times2^4\\
&\qquad+d_3\times2^3+d_2\times2^2+d_1\times2^1+d_0\times2^0\\
&=\underbrace{(d_7\times2^3+d_6\times2^2+d_5\times2^1+d_4\times2^0)}_{①\ \longrightarrow\ h_1}\times\underbrace{2^4}_{16^1}\\
&\qquad+\underbrace{(d_3\times2^3+d_2\times2^2+d_1\times2^1+d_0\times2^0)}_{②\ \longrightarrow\ h_0}\times\underbrace{2^0}_{16^0}\\
&=(d_7\times2^3+d_6\times2^2+d_5\times2^1+d_4\times2^0)\times16^1\\
&\qquad+(d_3\times2^3+d_2\times2^2+d_1\times2^1+d_0\times2^0)\times16^0\\
&=h_1\times16^1+h_0\times16^0\\
&=(h_1\,h_0)_{16} \text{ ——— B}
\end{aligned}$$

图 4.38　二进制 4 位与十六进制 1 位的对应

12　二进制小数的表示方法

要　点

为用二进制表示小数，设 n 为十进制小数，d_i 为二进制的一位，则有

$$n=2^{-1}\times d_1+2^{-2}\times d_2+2^{-3}\times d_3+\cdots+2^{-m}\times d_m+\cdots$$

据此，求出 $d_i=0$ 或 $d_i=1$，写成 $0.d_1d_2\cdots d_{k-1}d_k$ 即可。

解　释

二进制小数

二进制小数各位的权重为 2 的负幂，即分别为 $2^{-1}=0.5$，$2^{-2}=0.25$，等等。当用二进制表示小数时，为使与原十进制小数相等，有的权重要计入算式（$d_i=1$），有的权重则不要计入算式（$d_i=0$），由此确定出的 d_i 写成 $0.d_1d_2\cdots d_{k-1}d_k$ 即可。

例如，用二进制表示十进制小数 $(0.6875)_{10}$，则为

$$\begin{aligned}(0.6875)_{10}&=0.5\times1+0.25\times0+0.125\times1+0.0625\times1\\&=2^{-1}\times1+2^{-2}\times0+2^{-3}\times1+2^{-4}\times1\\&=(0.1011)_2\end{aligned}$$

变换为二进制小数的简便方法

如图 4.39 所示，用 2 去乘要变为二进制的小数。将其结果的整数部分写在旁边，而将其小数部分与前面的小数对齐写在其下。对此小数部分再乘 2，将其结果的整数部分写在旁边，小数部分写在下边。重复此过程直至小数部分为 0。然后，将写在旁边的 1 和 0 从上边开始按顺序写在“0.”之后，即为变换结果。然而，用二进制数表示小数时，有时并不能只用 2^n 来完整地表示原来的十进制数值。所以，在将十进制小数变换为二进制小数时，有时会产生误差（见本节的例题）。

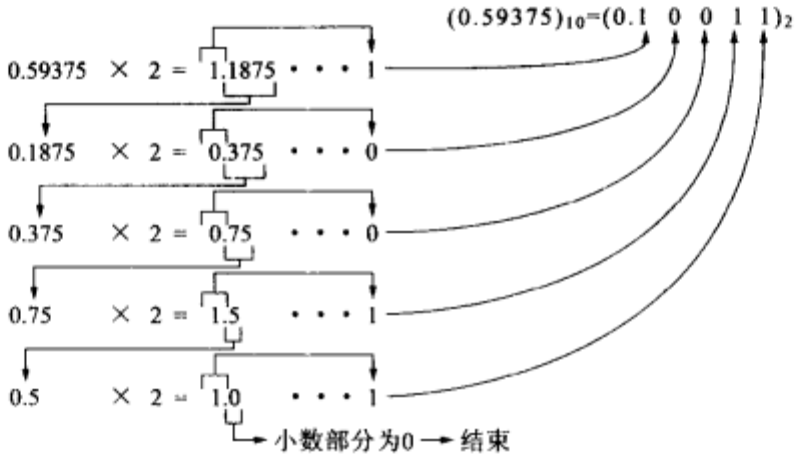


图 4.39　将小数变为二进制

相关知识

◆ 固定小数点表示和浮动小数点表示

例如，对于二进制小数$(0.000000001)_2$（$=(0.0001953125)_{10}$），当小数点后能够显示的位数只有 8 位时，最后的 1 位就得舍去而被当作零对待。由此引起的与原数值的差称为舍尾误差。而使用指数表示方法时，上述数值的二进制指数表示则为

$$(0.000000001)_2=(0.1)_2\times 2^{-9}$$

这里，$(0.1)_2$ 称为尾数，2^{-9}的 2 称为基数，-9 称为指数。因为是二进制，所以基数为 2。而且，为了尽量减少被舍弃的位数，应将尾数的 2^{-1}部分（小数点的紧右边）变为 1。这叫做正规化。这一正规化的二进制数，在计算机内部是以图 4.40 所示的形式被存储记忆。原小数的小数点位置可以移动的表示方法称为浮动小数点表示，而小数点位置不动的表示方法称为固定小数点表示。



图 4.40　计算机内部的小数表示方法

例　题

将$(81.1721)_{10}$用二进制数表示。

解说　将 1 以上的实数用二进制表示时，应将其整数部分和小数部分分别变为二进制。$(81)_{10}=(1010001)_2$，小数部分可利用图 4.39 所列的方法变为二进制。这个例子中，图 4.39 的小数部分永不为 0。

答　$(81.1721)_{10}=1\ 010\ 001.001\ 011\ 0\cdots$

13　二进制的加法和减法

要　点

做二进制加法，同位间使用以下四个算式进行计算：

0＋0＝0，　1＋0＝1，　1＋1＝10，　1＋1＋1＝11

二进制减法，先求减数的 2 的补数，再按加法进行计算。

解　释

二进制的加法

二进制加法，像笔算那样，从后向前做加法是很简单的。图 4.41 给出了(38＋71＝109)的计算实例。1＋1 时有进位，本位为 0，上一位加此进位 1。进位后会遇到 1＋1＋1 的计算，此时本位为 1，上一位加进位 1。

```
进位 ⟶   11
      00100110
   +) 01000111
      01101101
```

图 4.41　二进制加法

补　数

补数

1 的补数

2 的补数

计算机做减法时，不用减法器而只用加法器进行计算，这就需要使用**补数**。表示负数时也要用补数。图 4.42 示出了补数的计算方法。首先，对要求补的二进制数的所有各位进行 0、1 间的反转。这叫做 **1 的补数**。然后对此补数的最低位加 1，其结果称为 **2 的补数**。

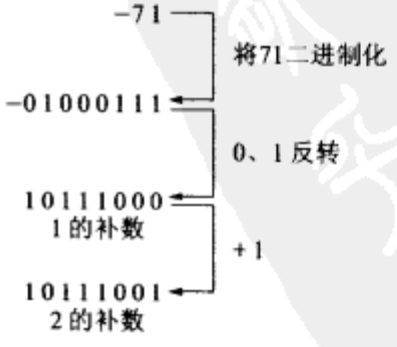


图 4.42　2 的补数及计算方法

二进制的减法

二进制的减法，如图 4.43 所示，首先求减数的 2 的补数，然后按二进制加法的规则做加法即可。其结果有进位时[见图 4.43(a)]，去掉进位位即为其答案，符号为正(+)，无进位时[见图 4.43(b)]，需对此结果求 2 的补数即为其答案，符号为负(−)。

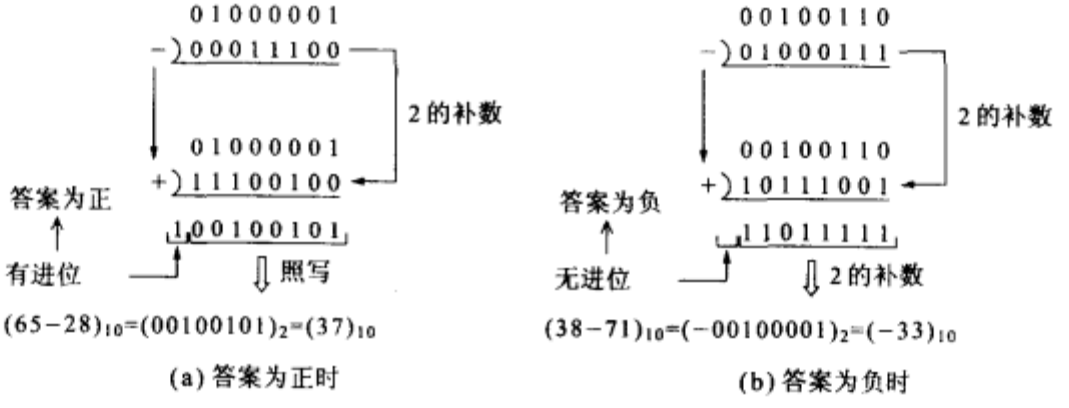


图 4.43　二进制的减法

相关知识

◆ 补数的概念

补数是借助于比欲求补的数值多 1 位且最高位为 1 其余皆为 0 的数值来获得的，如

$$2^8-71=100000000-01000111=10111001$$

即为 71 的 2 的补数。

同理，十进制数 811 的补数，可借助于 1000，得到其补数，为 189(189 称为对十进制数的 10 的补数)。

例　题

有二进制数 A 和 B：A=01010101，B=01100110，A+B 的计算结果是下边的哪一个？

a. 01101010；　b. 01111010；　c. 10011010；

d. 10111011；　e. 11010101。

答　使用如图 4.41 所示的方法计算，具体过程如图 4.44 所示。可见答案为 d。

进位 ⟶ 1　　1
　　01010101
+)　01100110
　　10111011

图 4.44　二进制计算式

14　数字 IC

要　点

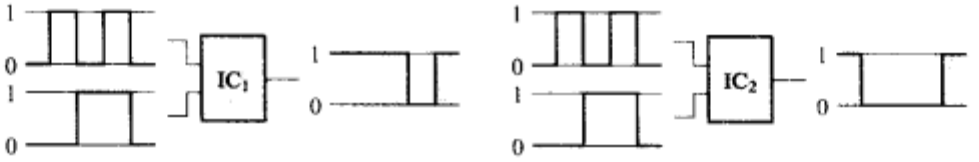
数字 IC(数字集成电路)是用来处理高低电平信号、对输入的电平状态进行运算和输出的电路元件。因而广泛应用于逻辑电路的组成及进行二进制运算。根据其功能和形状的不同分为很多种,分别用于不同的用途。

解　释

□ 数字 IC

数字 IC

数字 IC 用于处理低电平为 0、高电平为 1 的数字信号。对于输入信号进行该 IC 所规定的运算,并能得到 0 或 1 的输出。图 4.45 给出了数字 IC 输入数字信号的两个例子。



(a) IC_1(与非电路)　　(b) IC_2(或非电路)

图 4.45　数字 IC 输入数字信号的例子

□ 数字 IC 的分类

数字 IC 根据所用半导体材料的种类、外形、可进行的运算,分成很多品种进行生产和销售。

TTL

按照半导体材料的种类,可分为双极型的 **TTL**(Transistor-Transistor Logic,晶体管-晶体管逻辑)电路和单极性的 **MOS**(Metal Oxide Semi-conductor,金属氧化物半导体)电路两类。

MOS

SIP

DIP　PGA

按照外观分类,有 **SIP**(Single Inline Package,单列式封装)、**DIP**(Dual Inline Package,双列式封装)和 **PGA**(Pin Grid Array Package,阵列式引脚封装)等。

按照所进行的运算分类,可分为 NOT(非门)、AND(与门)、OR(或门)、NAND(与非门)、NOR(或非门),以及由它们构成的双稳态多谐振荡器、计数器等。这些都是逻辑电路

中常用的基本元件。

TTL

TTL 电路是将 pnp 或 npn 晶体管组合在一起制造的数字 IC。这种半导体工作时，多数载流子和少数载流子两者都要使用，因而也称为双极型。其特点是耗电多，但动作速度快。

MOS

MOS

MOS 电路是将使用金属氧化物接触的场效应管组合在一起制成的数字 IC。工作中只使用多数载流子，因而也称为单极型。其特点是允许电源电压变化大，耗电小，噪声大，一般用于低速电路中。

相关知识

◆ IC 的封装

IC 因其内部构造、安装场所及引脚数量的不同而形状各异。图 4.46 示出了部分外观。其中，图 4.46(a)为 SIP 型，其引脚排成一列，图 4.46(b)为 DIP 型，其引脚排为两列，这种形式最为常见，图 4.46(c)为 PGA 型，其引脚排成阵列，CPU 常作成此种形状。也有如图 4.47 所示的形状，这种 IC 可直接焊在无需打孔的电路板上。

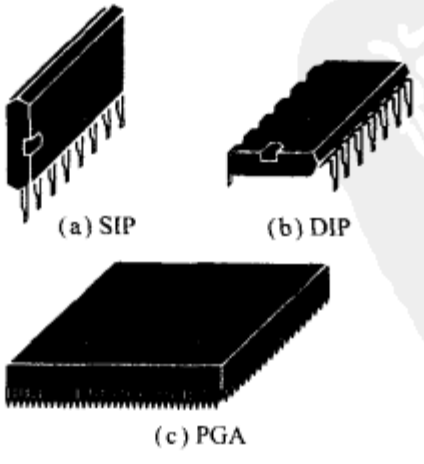


图 4.46 数字 IC 的封装

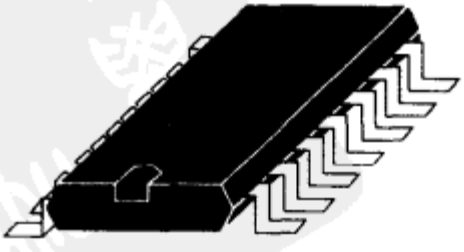


图 4.47 电路板无需打孔的数字 IC

15　逻辑电路基础

要　点

逻辑电路是用 1 和 0 进行运算，即进行逻辑运算的电路。基本的逻辑电路有 NOT(非)电路、AND(与)电路与 OR(或)电路。

解　释

NOT 电路

NOT 电路
逻辑电路

NOT 电路，顾名思义，是否定输入信号的**逻辑电路**。因为只处理 0 和 1，也可称为输入反转电路、非电路。图 4.48 示出了 NOT 电路的实际电路。此电路中，设电源电压 $V_{CC}=5V$，其输入、输出均是以 0V 为 0，以 5V 为 1。

输入为 0，即 0V 时，管子的基极无电流，集电极也无电流，因而 R_2 上无压降，输出电压与 V_{CC} 相同，为 5V，即输出为 1。

输入为 1，即 5V 时，管子的基极有电流 I_B 流过，集电极有电流 I_C 流过，集电极与发射极之间几乎无电压降，因而输出电压近于 0V，即输出为 0。

表 4.2 是考虑了 NOT 电路的所有输入、输出关系的**真值表**。

真值表

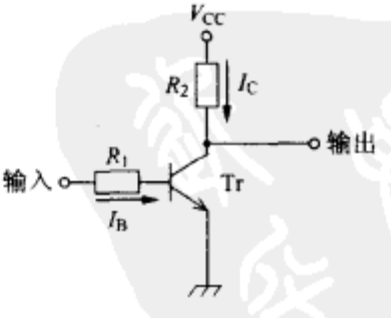


图 4.48　NOT 电路

表 4.2　NOT 电路的真值表

输入	输出
0(0V)	1(5V)
1(5V)	0(0V)

* 参见节第 2 章第 14 节所述的 CMOS 构成的 NOT 电路。

AND 电路

AND 电路

AND 电路是输入全为 1 时输出为 1 的逻辑电路。图 4.49 给出了有两个输入的实际 AND 电路。电路中，电源电压 $V_{CC}=5V$，输入、输出的 0V 为 0，5V 为 1。

输入全为0，即0V时，输入端和V_{CC}间有电流流通，输出电压近乎0V。即使给其中一个输入端加上5V电压，由于二极管的作用，输出仍为0。

输入全为1，即全为5V时，输入端1、2与V_{CC}电位相同，二极管D_1、D_2中无电流流通，输出电压为电源电压5V，即输出为1。表4.3为此AND电路的真值表。从表中可知，AND电路可以说就是乘法电路。

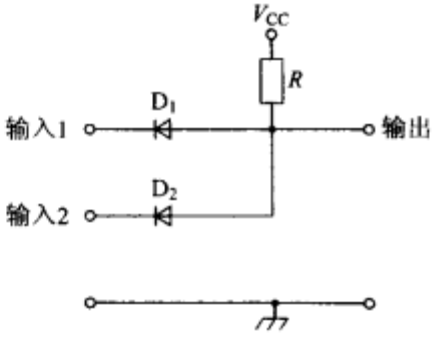


图4.49 AND电路

表4.3 AND电路的真值表

输入1	输入2	输出
0(0V)	0(0V)	0(0V)
0(0V)	1(5V)	0(0V)
1(5V)	0(0V)	0(0V)
1(5V)	1(5V)	1(5V)

OR电路

OR电路

OR电路是输入只要有1时输出即为1的逻辑电路。图4.50给出了有两个输入端的实际的OR电路。电路中，输入、输出的0V为0，5V为1。

输入全为0，即0V时，二极管D_1、D_2中均无电流，因而输出与地同，为0V，即输出为0。

输入只要有1个为1，即5V时，二极管就有一个导通，输出即与输入同为5V，即输出为1。

表4.4为此OR电路的真值表。从表中可知，OR电路可以认为是不进位的加法电路。

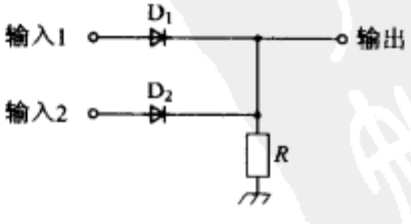


图4.50 OR电路

表4.4 OR电路的真值表

输入1	输入2	输出
0(0V)	0(0V)	0(0V)
0(0V)	1(5V)	1(5V)
1(5V)	0(0V)	1(5V)
1(5V)	1(5V)	1(5V)

相关知识

◆ 逻辑电路的符号

NOT 电路、AND 电路和 OR 电路均有一简单的符号，用来代替图 4.48 至图 4.50 中实际电路图的绘制。这些符号显示在图 4.51 中，叫做逻辑电路符号。图 4.51 所示的这些符号还特别称为 MIL 符号(Military standard 符号，军用标准符号)，是一种使用非常广泛的符号。

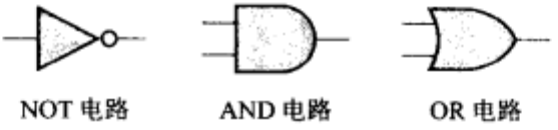


图 4.51　逻辑电路符号(MIL 符号)

◆ 正逻辑和负逻辑

在一般逻辑电路中，将低电平当作逻辑 0，将高电平当作逻辑 1。但是也可以把低电平当作 1 而把高电平当作 0。前者称为正逻辑，后者称为负逻辑。

表 4.5 给出的是 AND 电路的负逻辑真值表，与表 4.3 相比正好相反，但是与表 4.4 所列的 OR 电路的作用则相同。因此，为区分正、负逻辑，如图 4.52 所示，在电路输入端标一个圆圈用以表示负逻辑。逻辑运算及表示输出时使用 OR＋NOT(NOR，或非)电路符号。

表 4.6 是 OR 电路的负逻辑真值表。与表 4.4 相比正好相反，而与表 4.3 的 AND 电路的作用则相同。因此，用负逻辑表示 OR 电路时，应如图 4.53 所示，在输入端标上圆圈。逻辑运算及表示输出时使用 AND＋NOT(NAND，与非)电路符号。

表 4.5　负逻辑 AND 电路真值表

输入 1	输入 2	输出
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

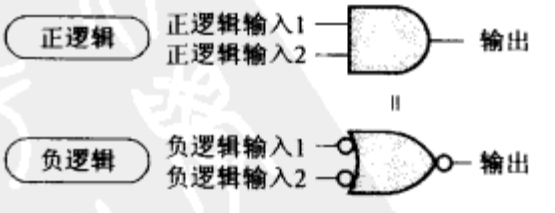


图 4.52　AND 电路的正、负逻辑

表 4.6 负逻辑 OR 电路真值表

输入 1	输入 2	输出
1	1	1
1	0	0
0	1	0
0	0	0

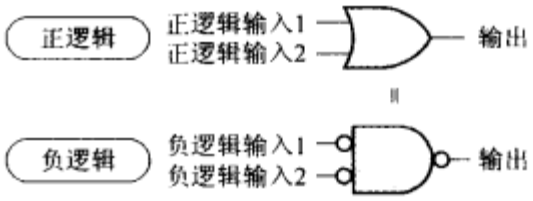


图 4.53 OR 电路的正、负逻辑

◆ 门限电压

在图 4.48 至图 4.50 所示的逻辑电路中，是将逻辑 0 当作 0V、逻辑 1 当作 5V 进行说明的。实际上，在使用晶体管及二极管的电路中，作为逻辑 0 的端口，电压常常在 0V 以上，而作为逻辑 1 的端口，电压则常常在 5V 以下。加之信号上还叠加有噪声时，如果只将严格的 0V 和 5V 认作逻辑 0 和逻辑 1，就很难正确区分逻辑信号的 0 和 1。

因此，就要设计一个界限，规定 0～5V 之间电压不足多少算作 0、电压超过多少算作 1。所规定的这个电压就叫做门限(threshold)电压。可见，在这个门限电压附近半导体的工作是不稳定的。因此，实际上是把 0.6V 以下认作 0，而把 2.5V 以上认作 1。

由于有这个门限设定，尽管晶体管和二极管上有管压降，尽管信号中多少也有点噪声混入，都不妨碍对 0 和 1 信号的正确区分。

应用知识

要将 AND 和 OR 电路分别变换为 OR 和 AND 电路时，只需按图 4.54 所示，将原来标的圆圈去掉，原来未标的添上即可。图 4.52 和图 4.53 也就是这种变换的例子。



图 4.54 AND 与 OR 逻辑电路的互变

这种变换，是由布尔代数 AND 和 OR 互变法则（德·摩根定理）理论上推导出来的。图 4.55 给出了德·摩根定理公式及相应的逻辑电路变换。

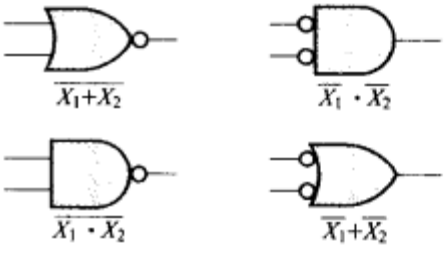


图 4.55　德·摩根定理和 AND 与 OR 的互变

16　布尔代数

要　点

在逻辑电路中，将输入看作变量，输出看作变量的函数，AND 电路作为“·”，OR 电路作为“+”，NOT 电路以及圆圈标记换写成“−”，就可以用数学式子来表述逻辑电路的运算。这种数学就叫做布尔代数。

应用布尔代数的定律，以及以图表方式表示逻辑电路的文氏图和卡诺图，可以非常容易地进行数式的简化及证明。

解　释

□ 布尔代数

布尔代数
逻辑值

布尔代数是仅仅处理“真”和“假”这些**逻辑值**的代数学。在布尔代数中，真和假用逻辑电路的 1 和 0 表示，逻辑积、逻辑和、逻辑非的运算分别对应逻辑电路的 AND、OR、NOT 电路。这样，所有的逻辑电路都可以用称为逻辑式的数学式子来表达。图 4.56 给出了用逻辑式表示逻辑电路的例子。

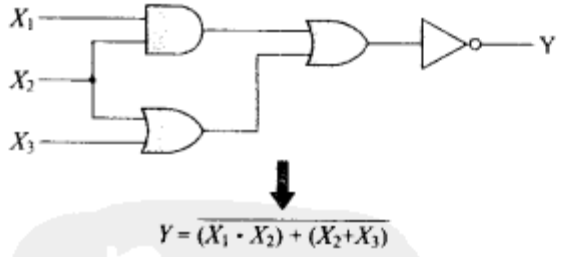


图 4.56　用布尔代数将逻辑电路写成数学式子

逻辑变量
逻辑函数

逻辑电路的输入对应布尔代数的变量，这种变量特称为**逻辑变量**，逻辑变量 X 的取值为 1 或 0。逻辑电路的输出对应布尔代数的函数，该函数特称为**逻辑函数**，逻辑函数 Y 的取值亦为 1 或 0。

基本的逻辑电路对应于逻辑运算符号。

逻辑积

AND 电路相当于布尔代数中的**逻辑积**。逻辑变量 X_1、X_2 的逻辑积表示为

$$Y=X_1\cdot X_2 \text{ 或 } Y=X_1X_2 \qquad (4.11)$$

逻辑积与AND电路的含义一样，只有当用符号“·”连起来

的逻辑变量全为 1 时，函数 Y 才为 1。

逻辑和

OR 电路相当于布尔代数中的**逻辑和**。逻辑变量 X_1、X_2 的逻辑和表示为

$$Y = X_1 + X_2 \tag{4.12}$$

逻辑和与 OR 电路的含义一样，用符号“+”连起来的逻辑变量中，无论哪一个为 1 时，函数 Y 即为 1。

逻辑非

NOT 电路与布尔代数中的**逻辑非**相对应。逻辑变量 X 的逻辑非表示为

$$Y = \overline{X} \tag{4.13}$$

逻辑非与 NOT 电路的含义一样，它表示对符号“—”下的逻辑变量(或逻辑式)的否定。

有了上述这些布尔代数的逻辑变量、逻辑函数及逻辑运算符号，就可以用逻辑式子来描述逻辑电路。

布尔代数的定律

布尔代数具有如表 4.7 所示的定律。这些定律对于逻辑式的变换及化简都是非常必要的。

表 4.7　布尔代数的定律

(1) $\overline{\overline{X}} = X$	(2) $X + \overline{X} = 1$ $X \cdot \overline{X} = 0$
(3) $X + X = X$　$X \cdot X = X$	(4) $X_1 + X_2 = X_2 + X_1$ $X_1 \cdot X_2 = X_2 \cdot X_1$
(5) $X_1 + 1 = 1$　$X_1 + 0 = X_1$　$X_1 \cdot 1 = X_1$　$X_1 \cdot 0 = 0$	
(6) $(X_1 \cdot X_2) \cdot X_3 = X_1 \cdot (X_2 \cdot X_3)$　$(X_1 + X_2) + X_3 = X_1 + (X_2 + X_3)$	
(7) $X_1 + X_2 \cdot X_3 = (X_1 + X_2) \cdot (X_1 + X_3)$ $X_1 \cdot (X_2 + X_3) = X_1 \cdot X_2 + X_1 \cdot X_3$	
(8) $X_1 + X_1 \cdot X_2 = X_1$　$X_1 \cdot (X_1 + X_2) = X_1$	
(9) $\overline{X_1 + X_2} = \overline{X_1} \cdot \overline{X_2}$　$\overline{X_1 \cdot X_2} = \overline{X_1} + \overline{X_2}$	

德·摩根定理

表中的(9)式特称为**德·摩根定理**，用于逻辑积与逻辑和之间的相互变换。

文氏图

文氏图

文氏图是以图形方式来表示逻辑式，可以直观地理解逻辑式的内容。

文氏图的表述方法如图 4.57 所示，方框中按逻辑变量的个数画圆，圆中分别写上逻辑变量的名字。画的时候要注意圆间要有交叠。

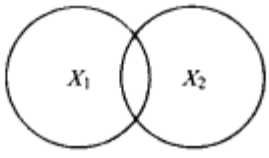


图 4.57 文氏图

文氏图各部分的意义如下：X_1 是圆内的全部，$\overline{X}_1$ 是圆外的全部，X_1+X_2 是包括交叠部分在内的 X_1 和 X_2 两圆内部的全部，$X_1 \cdot X_2$ 则是 X_1 和 X_2 两圆交叠的部分（见图 4.58）。如图 4.59 所示，如果用文氏图来证明布尔代数中的德·摩根定理，则非常简单。

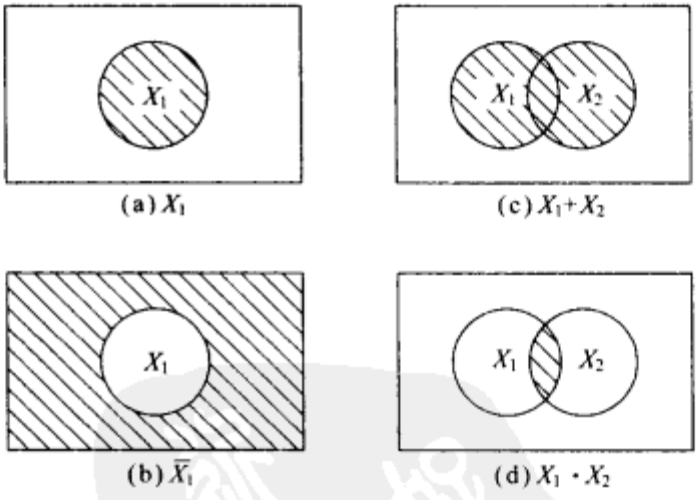


图 4.58 文氏图各部分的意义

卡诺图

卡诺图

卡诺图用于对冗长的逻辑式进行化简。

4 变量的卡诺图如图 4.60 所示。图中各格中填入相应的逻辑式。X_1X_2 及 X_3X_4 各栏中给出以 X_i 为 1、以 $\overline{X}_i$ 为 0 的所有组合。注意这时 X_1X_2 及 X_3X_4 的各栏中，必须是 00→01→11→10 这样的顺序。书写时一定要注意，无论是哪一个逻辑变量由 0 变为 1 或由 1 变为 0，其他的变量都应保持不变。

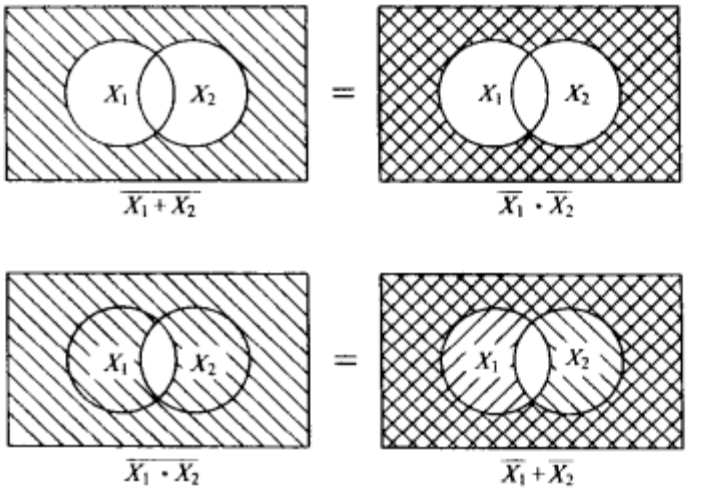


图 4.59　用文氏图证明德·摩根定理

X_3X_4 \ X_1X_2	00	01	11	10	
00	$\overline{X_1}\,\overline{X_2}\,\overline{X_3}\,\overline{X_4}$	$\overline{X_1}X_2\overline{X_3}\,\overline{X_4}$	$X_1X_2\overline{X_3}\,\overline{X_4}$	$X_1\overline{X_2}\,\overline{X_3}\,\overline{X_4}$	← ①
01	$\overline{X_1}\,\overline{X_2}\,\overline{X_3}X_4$	$\overline{X_1}X_2\overline{X_3}X_4$	$X_1X_2\overline{X_3}X_4$	$X_1\overline{X_2}\,\overline{X_3}X_4$	
11	$\overline{X_1}\,\overline{X_2}X_3X_4$	$\overline{X_1}X_2X_3X_4$	$X_1X_2X_3X_4$	$X_1\overline{X_2}X_3X_4$	
10	$\overline{X_1}\,\overline{X_2}X_3\overline{X_4}$	$\overline{X_1}X_2X_3\overline{X_4}$	$X_1X_2X_3\overline{X_4}$	$X_1\overline{X_2}X_3\overline{X_4}$	← ②
	③			④	

图 4.60　卡诺图

这里举例说明卡诺图的使用方法。化简下面的逻辑式：

$$Y=\overline{X}_1\overline{X}_3\overline{X}_4+X_1X_2\overline{X}_3\overline{X}_4+X_1\overline{X}_2\overline{X}_3\overline{X}_4$$
$$+\overline{X}_1X_2X_3\overline{X}_4+X_1X_2X_3\overline{X}_4$$

因为式子的第 1 项不含 X_2，所以首先要用如表 4.7 所列的定律(2)、(5)、(7)将其变为含有 X_2 的形式：

$$\overline{X}_1\overline{X}_3\overline{X}_4=\overline{X}_1(1)\overline{X}_3\overline{X}_4=\overline{X}_1(X_2+\overline{X}_2)\overline{X}_3\overline{X}_4$$
$$=\overline{X}_1X_2\overline{X}_3\overline{X}_4+\overline{X}_1\overline{X}_2\overline{X}_3\overline{X}_4$$

则原式变为

$$Y=\overline{X}_1X_2\overline{X}_3\overline{X}_4+\overline{X}_1\overline{X}_2\overline{X}_3\overline{X}_4+X_1X_2\overline{X}_3\overline{X}_4$$
$$+X_1\overline{X}_2\overline{X}_3\overline{X}_4+\overline{X}_1X_2X_3\overline{X}_4+X_1X_2X_3\overline{X}_4$$

这样一来，所有各项都用全体逻辑变量的积来表示，而以这些项的逻辑和所表述的式子则称为**范式**。

范式

再如图 4.61 所示，在卡诺图中与该逻辑式的各项相对应的格子中写入“1”。然后将这些写有“1”的格子成组（2格、4格、…为一组，即 2^n 格为一组）地用尽可能大的四边形围起来。此时应注意图中的①和②、③和④应理解为是邻接的。画出的四边形相互重叠也无妨，只要在框内均可。图 4.61 中的(1)和(2)就是四边形围起来的例子。

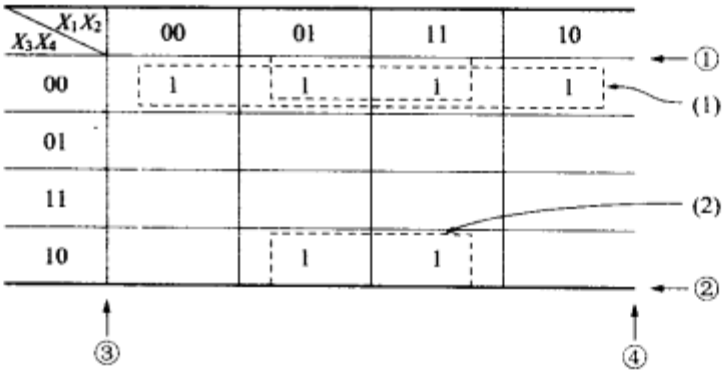


图 4.61 用卡诺图化简逻辑式

在四边形围着的区域内，将同时含有其 0 和 1 的逻辑变量去除，剩余变量以逻辑积形式相连，成为式子的一项。图中四边形：(1)中含有 X_1、X_2 的 0 和 1，剩下的就是 $\overline{X}_3\overline{X}_4$，(2)中含有 X_1、X_3 的 0 和 1，剩下的则为 $X_2\overline{X}_4$。将这些剩余项以逻辑和相连，即为化简结果：

$$Y=\overline{X}_3\overline{X}_4+X_2\overline{X}_4$$

与原式相比，结果变得格外简单。而且，由于逻辑积、逻辑和、逻辑非已经变得很少，逻辑电路自身也简单了。可见，使用卡诺图，远比使用布尔代数定律更易化简逻辑式，同时也使逻辑电路得以简化。

例 题

不改变式子的性质而将 $\overline{X_1 \cdot \overline{X_2}}$ 中的“·”号变为“+”号，将 $X_1+\overline{X}_2$ 中的“+”号变为“·”号（见图 4.54）。

解说　无论是将“·”号变为“+”号，还是将“+”号变为“·”号，都应使用表4.7中(9)式的德·摩根定理，则

$$\overline{X_1 \cdot \overline{X_2}} = \overline{X}_1 + \overline{\overline{X}_2} = \overline{X}_1 + X_2$$

$$X_1 + \overline{X}_2 = \overline{\overline{X_1} + \overline{X_2}} = \overline{\overline{X}_1 \cdot \overline{X}_2} = \overline{\overline{X}_1 \cdot X_2}$$

答　$\overline{X_1 \cdot \overline{X_2}} = \overline{X}_1 + X_2$，$X_1 + \overline{X}_2 = \overline{\overline{X}_1 \cdot X_2}$

17　NAND 电路和 NOR 电路

要　点

{AND/OR}＋NOT＝{NAND/NOR}

除了基本的逻辑电路 AND(与)、OR(或)及 NOT(非)外，还有一些使用频度很高的属于基本逻辑电路组合的逻辑电路，其中最具代表性的是 NAND(与非)电路和 NOR(或非)电路。

解　释

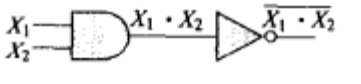
NAND 电路和 NOR 电路

反相器

NAND 电路

在 AND 电路后接一个 NOT 电路(**反相器**)，即成为**NAND 电路**。若要用逻辑符号加以说明，则如图 4.62(a)所示，输入 X_1 和 X_2 相与，即 $X_1 \cdot X_2$，然后经 NOT 电路反相后输出。这时，作为输出的布尔代数表示，要在输出的符号上添加一横杠，写成$\overline{X_1 \cdot X_2}$，读作 X_1 和 X_2 相与的非，此即 NAND(not-AND)。

NAND 电路的常用逻辑符号，如图 4.62(b)所示，是将图 4.62(a)简化，在其 AND 符号的输出侧画一个小圆圈来表示。图 4.62(c)是表示其输入、输出关系的真值表，可见，输出是输入 X_1、X_2 相与的非。



(a) 基本构成



(b) 符号

输入		输出	
X_2	X_1	AND	NAND
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

(c) 真值表

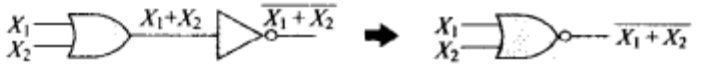
图 4.62　NAND 电路

NOR 电路

在 OR 电路后接一个 NOT 电路，即成为**NOR 电路**。如图 4.63(a)所示，输入为 X_1+X_2，经 NOT 电路反相后输出。输出的布尔代数表示为$\overline{X_1+X_2}$，因为是对或的否定(not-OR)，因而称为 NOR。

其常用的逻辑符号如图 4.63(b)所示，用 OR 电路符号

的输出侧加小圆圈表示。图 4.63(c)是其真值表。



(a) 基本构成　　(b) 符号

输入		输出	
X_2	X_1	OR	NOR
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

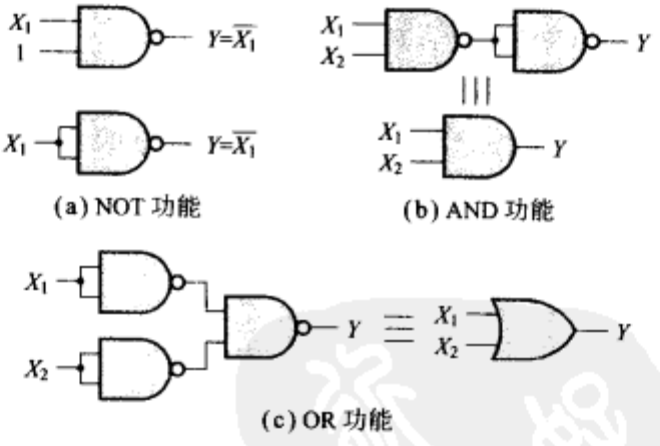
(c) 真值表

图 4.63　NOR 电路

相关知识

◆ NAND 的活用

NAND 和 NOR 在数字电路中用得非常多。这是因为仅用 NAND 就可以构成 NOT、AND 及 OR。图 4.64 是其构成的实例。正因为如此，通过组合可以很方便地得到其他所需的逻辑电路，因而其应用非常广泛。



(a) NOT 功能　　(b) AND 功能

(c) OR 功能

图 4.64　NAND 的活用

例　题

将图 4.65 所示的脉冲信号加于 NAND 电路(见图 4.62)和 NOR 电路(见图 4.63)的 X_1 输入端，而 X_2 的输入为 1 和为 0 时，输出脉冲信号如何？

答　注意输出随 X_2 的输入状态的不同而不同。在 NAND 中，$X_2=0$ 时，输出总为 1，而 $X_2=1$ 时，输出脉冲为 011001。在 NOR 中，$X_2=1$ 时，输出总为 0，而 $X_2=0$ 时，输出脉冲为 011001。

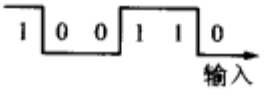


图 4.65　脉冲输入信号

18　基本逻辑电路的组合

要　点

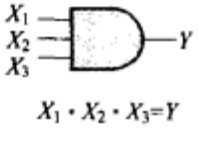
将基本逻辑电路进行组合，可以获得具有某种功能的逻辑电路。典型的组合逻辑电路有多输入门电路、异或电路及同或电路。

解　释

多输入门电路/异或电路/同或电路

多输入门电路

多输入门电路如图 4.66 所示。图 4.66(a)所示为三输入与门电路。逻辑电路中经常会遇到变量有 3 个的情况。3 个输入为 X_1、X_2、X_3，输出为 Y 时，用布尔代数表示可以写成 $X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = Y$，其真值表如图 4.66(b)所示，只有输入全为 1 时，输出才为 1。

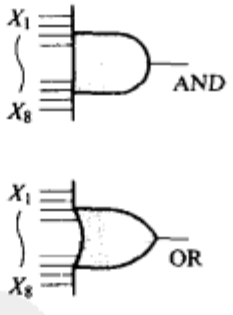


$X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 = Y$

(a) 三输入与门电路

输入			输出
X_3	X_2	X_1	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

(b) 真值表



(c) 多输入门电路

图 4.66　多输入门电路

推而广之，组合逻辑电路可以有如图 4.66(c)所示的多输入与门，多输入或门等。与三输入一样，多输入与门只有当输入 $X_1 \sim X_8$ 全为 1 时输出才为 1。而对于多输入或门，只要输入 $X_1 \sim X_8$ 不全为 0，输出都是 1。

异或

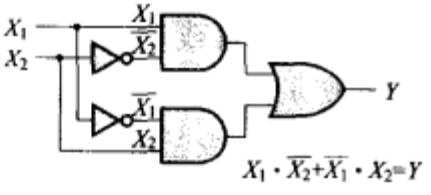
XOR 电路

图 4.67(a)所示的电路称为**异或**(exclusive OR)电路，一般常简称为 **XOR 电路**。该电路进行的逻辑运算为 $X_1 \cdot \overline{X}_2 + \overline{X}_1 \cdot X_2 = Y$，输入 X_1、X_2 的状态不一致时输出为 1。图 4.67(b)是其符号，布尔代数中用符号“⊕”来表示 XOR 功能。

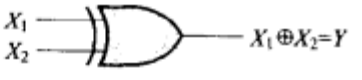
同或电路

图 4.67(c)是输入 X_1、X_2 的状态一致时输出为 1 的逻辑电路。**这种电路称为同或电路**，进行的逻辑运算为 $\overline{X}_1 \cdot \overline{X}_2 + X_1 \cdot X_2 = Y$。从图 4.67(e)所列的真值表可知，该运算是对异或的否定。因而其电路也可以在 XOR 电路后接反相器来构成，称之为异或非 **XNOR 电路**，在布尔代数中的符号如图 4.67(d)所示。

XNOR 电路

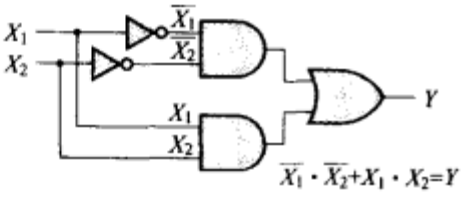


(a) 异或(XOR)逻辑电路

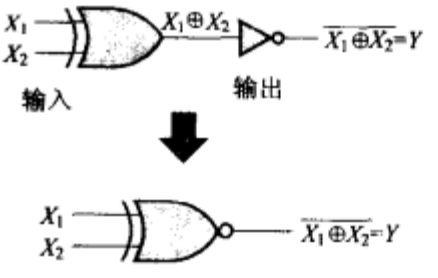


⊕:XOR 功能的布尔代数表示

(b) XOR 门的符号



(c) 同或电路



(d) XNOR 门

输入		输出	
X_2	X_1	异或 XOR	同或 XNOR
0	0	0	1
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

(e) 真值表

图 4.67　组合逻辑电路

相关知识

◆ 奇偶校验

从图 4.67(e)所列的真值表可知，对于 XOR 电路，表中第 2 行和第 3 行信号为 1 的输入有奇数个，这时输出为 1，而表中第 1 行和第 4 行信号为 1 的输入没有或有偶数个，输出为 0。因而，XOR 电路也可以称为奇数校验电路，而 XNOR 电路则是偶数校验电路。

19　半加器和全加器

要　点

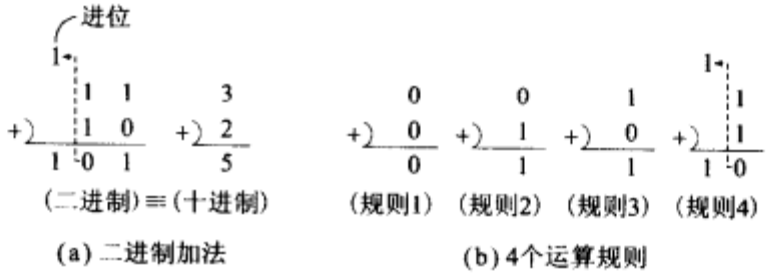
数字电路的加法，如图 4.68(a)所示，是按二进制运算的。因而就得到图 4.68(b)所示的 4 个运算规则。能够按这些规则运算的组合逻辑电路就是加法器。

解　释

半加器/全加器

半加器

图 4.69 是二进制一位加法电路，称为**半加器**(half adder)。满足图 4.68(b)所列 4 个运算规则的真值表，可以写成如图 4.69(a)所示的样子。图 4.69(b)是半加器(HA)的方框图，其中输入为 X_1、X_2，输出为和 S 及进位 C_o。

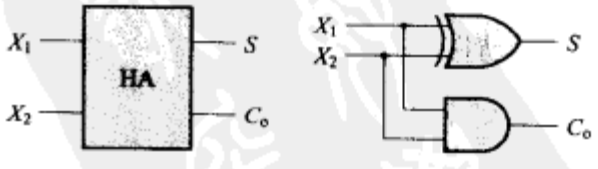


(a) 二进制加法　　(b) 4个运算规则

图 4.68　二进制加法及其规则

输入		输出	
X_2	X_1	和 S	进位 C_o
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

(a) 真值表



(b) 框图　　(c) 逻辑电路

图 4.69　半加器

从真值表可看出，为实现输出 S，进行此加法运算的逻辑电路必须具有输入不一致时输出为 1 的 XOR 电路功能。而对于进位 C_o，则用 AND 电路来实现。可见，半加器的构

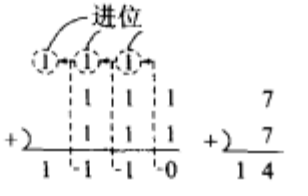
成如图 4.69(c)所示即可。

下面来看一下如图 4.70(a)所示的二进制加法实例。第 1 位相加产生的进位 1 要加到第 2 位的相加中，变成 1＋1＋1，后面也要遇到同样的加法。这时，加法运算的输入就是 3 个。很显然，半加器不能完成这样的运算。为此，就要在图 4.68(b)所示的 4 个加法运算规则之上，再增加一个考虑进位项的规则。图 4.70(b)所示的规则就是必需的。能够实现进位加法运算的电路称为**全加器**(full adder)。

全加器

图 4.70(c)给出了表示全加器的方框图。图中 C_{in} 为进位输入。在图 4.70(d)中，首先用半加器进行两个输入的加法，然后将其和 S 与进位输入 C_{in} 再用半加器相加以实现进位加法。此时，两个半加器无论哪个的 C_o 输出为 1，最后的 C_o 输出都应该为 1。这就需要使用 OR 电路。

通常，进行大的二进制数相加时，半加器仅用于第 1 位相加，其他位(2、4、8、16 位等)的相加则要使用带进位输入的全加器。

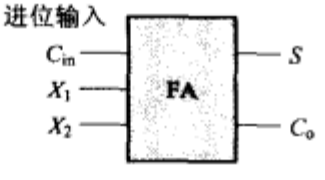


(a) 加法例

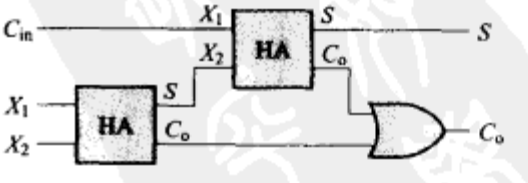
X_1+X_2+进位输入	S	C_o	进位输出
1＋1＋1＝	1	1	1

3 输入　　进位输入或输出

(b) 二进制加法的又一规则



(c) 框图



(d) 两个半加器和一个OR电路的组合

图 4.70　全加器

20　编码器和译码器

要　点

数字电路中因为要用二进制码进行处理，所以由十进制到二进制的变换以及由二进制到十进制的变换都是非常重要的。完成这些变换的逻辑电路是编码器和译码器。

解　释

编码器和译码器

图 4.71 所示的左侧设置有 1～9 九个开关，根据这些开关的通(ON)断(OFF)可以输入十进制码。而要进行数字处理时，首先就必须将这些输入由十进制码变为二进制码。实现这一二进制码变换的逻辑电路称为**编码器**(encoder)。二进制码经图中的后续逻辑电路处理，输出时，还必须由二进制再变换到十进制。实现这一向十进制码变换的逻辑电路称为**译码器**(decoder)。译码器十进制化了的信号经 LED 显示，给出处理结果。

编码器

译码器

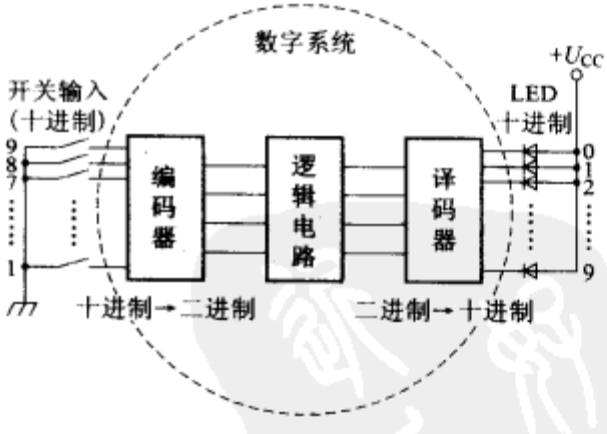


图 4.71　数字处理系统构成举例

编码器的构成可用图 4.72 所示的 OR 电路的组合来实现。输入为图 4.71 所示的 1～9，二进制换算时总共需要 2^3 位，输出则为 2^0(二进制第 1 位)、2^1(二进制第 2 位)、2^2(二进制第 3 位)和 2^3(二进制第 4 位)四个。例如，开关 6 输入时，2^1 位和 2^2 位的输出应为 1，而 2^0 位和 2^3 位的输出为 0，则总输出为二进制的 6(0110)。

译码器的构成可用图 4.73 所示的 NOT 电路和 AND 电路的组合来实现。与编码器相反，输入为二进制表述的 2^0、2^1、2^2、2^3 各位的状态，输出则要以十进制来表述，因而总共需要 0～9 十个输出。AND 电路输入侧的小圆圈是 NOT 电路的简单表示，意思是反相后再输入 AND 电路。与前面的例子相反，现在来看看二进制 0110 的输入。2^0 位和 2^3 位反相后输入为 1，2^1 位和 2^2 位原封不动输入 1，AND 电路的功能是输入全为 1 时输出为 1，可见，AND 电路 6 的输出为 1。

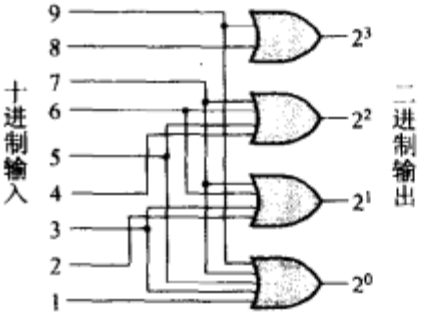


图 4.72　编码器

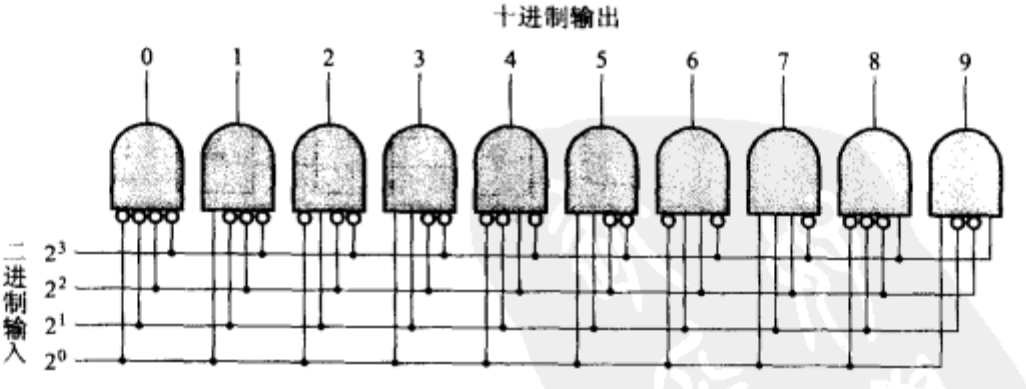


图 4.73　译码器

21 触发器

要 点

具有记忆保持功能的逻辑电路称为时序逻辑电路。时序逻辑电路是由称为触发器(flip flop)的电路构成的。RS触发器及JK触发器都是最基本的时序逻辑电路。

解 释

RS触发器和JK触发器

RS-FF

触发器(以下简称为 *FF*)中,最基本的是 ***RS-FF***。其逻辑符号如图 4.74(a)所示,图 4.74(b)是显示其功能的真值表。输入端由表示置位(set)的 S 和表示复位(reset)的 R 组成,输出有 Q 及 $\overline{Q}$(Q 的否定)端子。

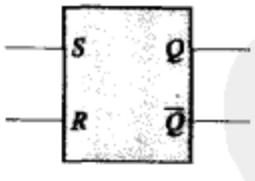
保持

由真值表可知,输出 Q、$\overline{Q}$ **保持** R、S 变化前的状态,输入 S 为 1、R 为 0 时输出 Q 送出 1,$\overline{Q}$ 送出 Q 的否定 0。其结果 *FF* 记着 1,该状态称为**置位状态**。相反,输入 S 为 0、R 为 1 时,输出 Q 送出 0,$\overline{Q}$ 送出 1,*FF* 记着 0,此称为**复位状态**。

置位状态
复位状态

反馈

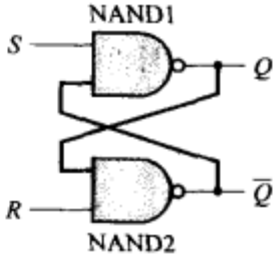
实现此触发动作的电路,可用将反馈引入 NAND 或 OR 电路的**反馈**来实现。图 4.74(c)给出了由 NAND 电路构成



(a) 逻辑符号

动作状态	输入		输出	
	S	R	Q	$\overline{Q}$
保持	0	0	不变	
置位	1	0	1	0
复位	0	1	0	1

(b) 真值表



动作状态	输入		输出	
	S	R	Q	$\overline{Q}$
阻塞	0	0	1	1
置位	0	1	1	0
复位	1	0	0	1
保持	1	1	不变	

(c) 由NAND 电路构成

图 4.74 RS-FF

的 FF。分析其动作时，注意图中粗线表示反馈。

现在，把各电路记为 NAND1、NAND2，设初始状态 R、S 均为 1，Q 为 0，$\overline{Q}$ 为 1。当 S 变为 0 时，NAND1 的输入为 0 和反馈来的 1，输出为 1，该输出反馈给 NAND2，NAND2 这时的输入就是 1 和 1，其输出为 0。如果 R 为 0、S 为 1 时，则同样的过程得到的结果相反。

通过这种仔细的动作分析，即可明白真值表所表示的结果。而且也明白输入全为 0 时输出全为 1。这种状态称为**阻塞状态**，FF 工作中不能这样输入。

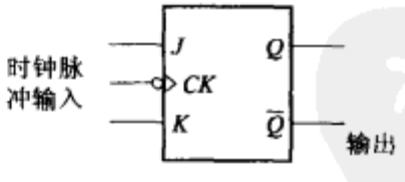
阻塞状态

RS-FF 中输入 R、S 同时为 0 时 FF 成为阻塞状态。为克服此缺点，可以使用 JK-FF。**JK-FF** 的逻辑符号如图 4.75(a)所示，JK-FF 有 3 个输入端，J 和 K 是数据输入端，**CK** 称为**时钟输入端**。时钟输入是为了与外部电路保持同步的脉冲输入。JK-FF 与 RS-FF 一个很大的不同是：只有 CK 的输入变化时 FF 的状态才会改变。CK 端的三角标记意味图 4.75(c)所示的是**边缘触发**，小圆圈则意味着时钟脉冲的下降沿触发。J、K 的输入经时钟信号 CK 同步后传送到输出。输出端与 RS-FF 一样，有 Q 端和 $\overline{Q}$ 端，如图 4.75(b)

JK*-*FF

***CK*　时钟输入端**

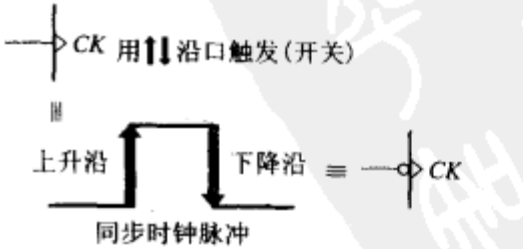
边缘触发



(a) 逻辑符号

动作状态	输入			输出	
	CK	J	K	Q	$\overline{Q}$
保持	1→0	0	0	不变	
复位	1→0	0	1	0	1
置位	1→0	1	0	1	0
翻转	1→0	1	1	翻转	

(b) 真值表



(c) 边沿触发器

图 4.75　JK-FF

的真值表所示，随着 J、K 输入的不同，其输出有保持、复位、置位等状态。然而，当 J、K 都为 1 时，每输入一个时钟脉冲，输出都要**翻转**一次。这一点与 *RS-FF* 区别很大。使用 *JK-FF* 可以构成很多别的 *FF*，因而也将 *JK-FF* 称为万能 *FF*。

翻转

相关知识

◆ *T-FF* 和 *D-FF*

触发器的种类很多。图 4.76 给出了 *T-FF* 和 *D-FF*。*T-FF* 是靠上下沿翻转的，*D-FF* 具有暂存数据、等待下一个脉冲到来时再输出的延时功能。

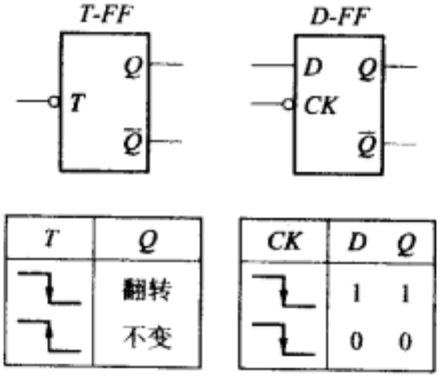


图 4.76 *T-FF*/*D-FF*

例 题

将适当的词语填入下面句子的（　）中。

逻辑电路大体上可以分为(a)逻辑电路和(b)逻辑电路，后者具有(c)功能，是由(d)电路构成的。

答 a：组合，b：时序，c：记忆，d：*FF*。

22　寄存器

要　点

一个 *FF* 可以记忆二进制 1 位(1bit)数据，所以，如果使用 *n* 个 *FF*，就可以记忆 *n*bit 的数据。能够记忆整个数据的电路称为寄存器(register)。

解　释

移位寄存器

寄存器是数字电路中应用很广的电路之一。该电路由于是由 *FF* 构成，因而属于时序逻辑电路。

图 4.77 所示的例子，是由 *D*-*FF* 构成的 4bit($2^4=16$)寄存器。*D*-*FF* 具有上一节所提到的**延时功能**，可将输入暂存，延时一个时钟周期后，将此输入原封不动地输出。

延时功能

如图 4.77 所示，每一同步时钟脉冲的下降沿将 4bit **并行数据**读入 *FF*，而将其内暂存的数据输出。假如各 *FF* 内初始状态为 0000，而这时的输入 $D_1\sim D_4$ 的数据为 0110，第一个脉冲到来时，0110 被暂存，而内部原来的数据 0000 则由 $Q_1\sim Q_4$ 输出。如果下边的输入为 0111，第二个脉冲会将 0111 暂存，而将原存的 0110 输出。

并行数据

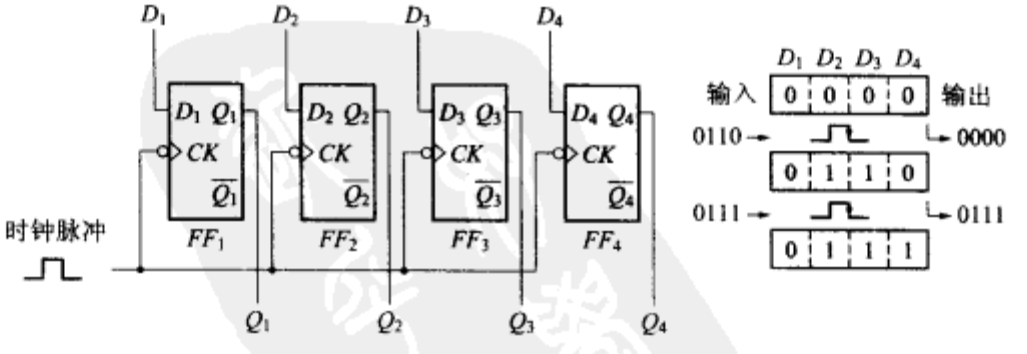


图 4.77　由 *D*-*FF* 构成的寄存器

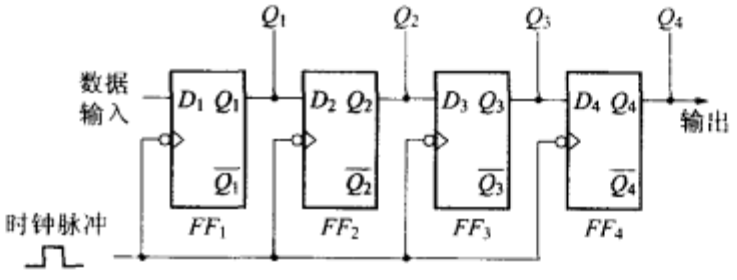
图 4.77 所示的寄存器是记忆并行数据的。但是输入数据时，也可方便地从高位向低位一位一位输入。像计算器中顺序输入3、4时，首先显示3，接着3移到上一位，空下来的

低位则显示 4。这种将暂存位置空出来而向下一位置移动的功能称为**移位功能**。使用这一功能就可以串行处理数据。用 FF 实现这一功能的电路称为**移位寄存器**。

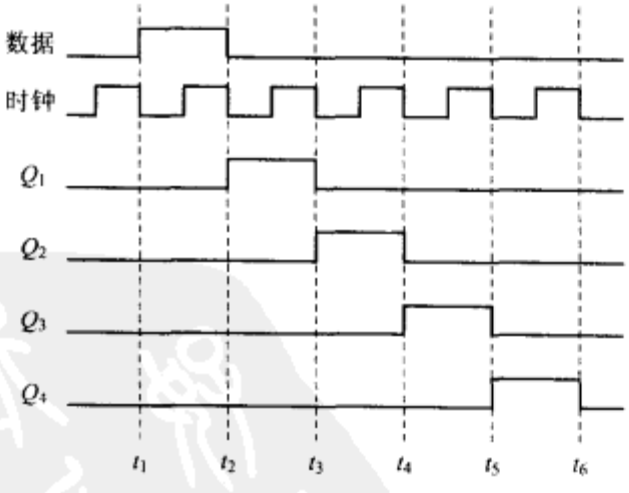
移位功能
移位寄存器

图 4.78(a)所示为由 *D-FF* 构成的 4bit 移位寄存器。与图 4.77 一样，*D-FF* 暂存，同步时钟脉冲到来时输出。这样一来，从 FF_1 的 D_1 输入的数据就会一步一步地移位并暂存于 FF_2、FF_3、FF_4 中。而每一时钟脉冲到来时，$Q_1 \sim Q_4$ 都会有输出，这样一来，**串行输入数据**即可并行输出显示。

串行输入数据



(a) 移位寄存器



(b) 时序

图 4.78 由 *D-FF* 构成的移位寄存器

这一连串的动作，通过**时序图**很容易明白。图 4.78(b)给出了各 *FF* 初始状态为 0、D_1 的输入为 1 时的时序图。该例的 *FF* 的时钟输入端画有小圆圈，因而是脉冲的下降沿到来时触发、输入数据发生变化。

时序图

相关知识

◆ 用 JK-FF 构成 D-FF

寄存器的基本单元是 D-FF，而 D-FF 通常是用 JK-FF 构成的。因而在教科书中多有用 JK-FF 直接描述寄存器的。但着眼于 D-FF 的工作原理则简单明了。如果能够理解 D-FF 和图 4.77、图 4.78，试考虑一下用图 4.79 取代 D-FF 来构成的寄存器电路。

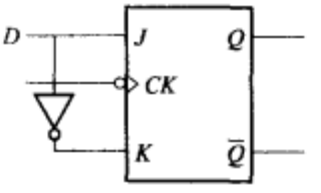


图 4.79　用 JK-FF 组成 D-FF

例 题

用 JK-FF 构成 2bit 移位寄存器，且用下降沿触发。并绘制出输入为 1 时的时序图。

答　如图 4.80 所示。时序图与图 4.78 所示的 Q_1、Q_2 相同。

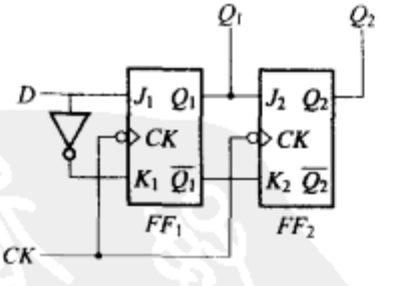


图 4.80　例题图

应用知识

D-FF 会将前一刻的数据原样送出，因而可以用作寄存器。

23 计数器及其原理

要 点

数脉冲个数的电路称为计数器(counter)。脉冲计数利用的是每一脉冲都要引起输出翻转的触发动作。

解 释

4进计数器和环形计数器

4进计数器

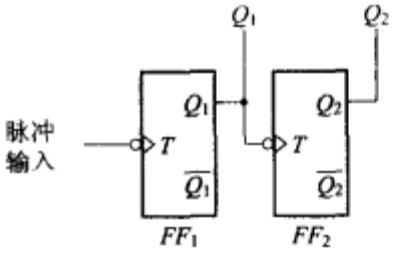
计数器电路最简单的例子是**4进**(2^2进)**计数器**。图4.81(a)给出了由*T-FF*构成的4进计数器电路。先看FF_1,它有一个输入端,具有脉冲下降沿触发的翻转功能。再看FF_2,FF_1的输出Q_1就是FF_2的输入,同样是脉冲下降沿触发。

给输入端输入时钟脉冲并分析其动作时,可用如图4.81(b)所示的时序图来说明。首先,脉冲1的下降沿使FF_1翻转,Q_1的输出由0→1,脉冲2再使其由1→0。由于这一翻转动作是下降沿,这时FF_2也会翻转,Q_2的输出由0→1。FF_2的下一次翻转是第4脉冲时,其余类推。此动作与十进制计数的对应关系如图4.81(c)所示。FF_1为第一位,FF_2为第二位,其输出Q_2、Q_1为反复的00、01、10、11。最大计数值为二进制的11(十进制的3),所以可以进行4进计数。

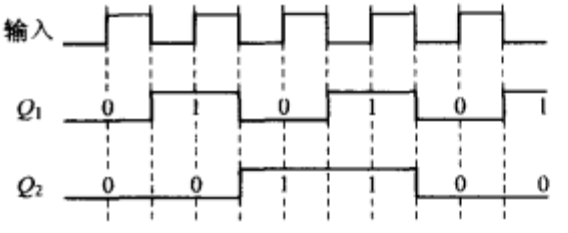
此例用的是*T-FF*。由于*T-FF*是*J*、*K*输入为1时的*JK-FF*,因而也可以用*JK-FF*来构成计数器。

环形计数器

另外还有其他各种计数器,如图4.82所示的**环形计数器**。环形计数器中,最后的*FF*的输出被反馈给最初的*FF*。这里给出的例子是由*JK-FF*构成的。此电路的状态是一个*FF*置为1,其他的*FF*均复位为0。输入同步时钟脉冲时,这个1会顺次向后面的*FF*移动,按照与*FF*数量相同的脉冲个数循环一圈,因而它就是位数等于*FF*个数的周期计数器。常用来判断某种特定的计数值。



(a) 4进计数器



(b) 时序

十进制计数	二进制计数	
	Q_2	Q_1
0	0	0
1	0	1
2	1	0
3	1	1

(c) 计数顺序

图 4.81　由 *T-FF* 构成的 4 进计数器

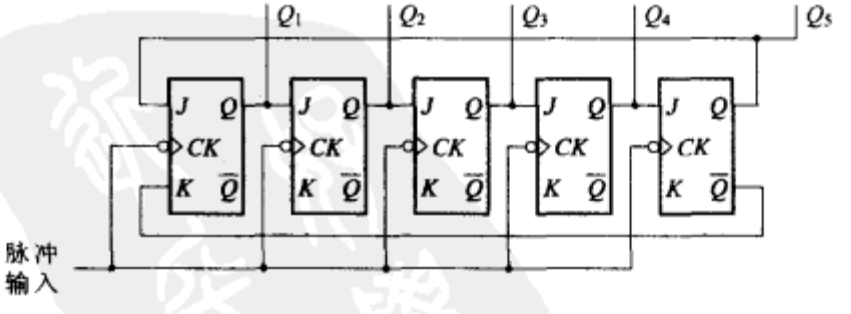


图 4.82　环形计数器

应用知识

因为计数器用的是翻转功能，因而可用 *T-FF*、*JK-FF* 来构成。

为对脉冲数量进行计数，也有使计数值下降的减计数器。使用 *T-FF* 进行 4 进计数时，只能是将如图 4.81(a)所示的 Q_1 作为 FF_2 的时钟输入。试分析其动作。

24　A-D 、D-A 转换电路

要　点

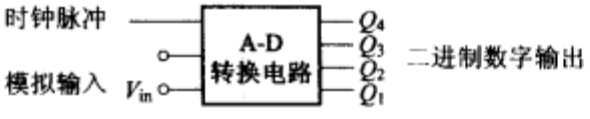
将模拟量变换为数字量的电路称为 A-D 转换电路，将数字量变换为模拟量的电路称为 D-A 转换电路。

解　释

A-D 转换电路和 D-A 转换电路

A-D 转换

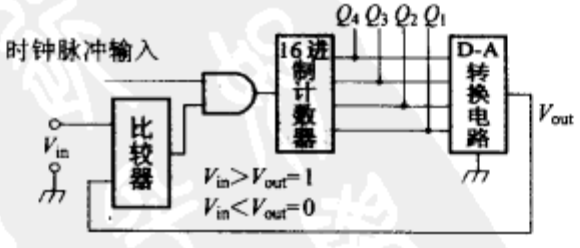
A-D 转换电路是要获得与模拟输入成比例的二进制数字输出的电路。图 4.83(a)是其方框图。因为要进行数字控制，因而有一个时钟脉冲输入端。图中 V_{in} 是输入电压，输出为 0000～1111 的二进制 4 位。



(a) 方框图

序号	模拟	二进制输出				序号	模拟	二进制输出			
	V_{in}	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1		V_{in}	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
1	0	0	0	0	0	9	0.8	1	0	0	0
2	0.1	0	0	0	1	⋮	⋮		⋮		
⋮	⋮		⋮			13	1.3	1	1	0	1
						⋮	⋮		⋮		
8	0.7	0	1	1	1	16	1.5	1	1	1	1

(b) 4 bit输出时的真值表



(c) 4 bit计数器逐次比较形A-D转换电路

图 4.83　A-D 转换电路

比较器

现假设 V_{in} 的范围为 0～1.5V。包括 0V 在内，可用 16 个二进制数来表示，则如图 4.83(b)所示，即可将模拟电压以 0.1V 的数字当量表示为数字量。在方框图的内部，主要是用**比较器**将模拟量转换为数字量。图 4.83(c)给出了其

内部构成的例子。图中的 V_{out}，是将计数器的二进制输出变为模拟电压的输出。比较器中不断与此电压**逐次比较**，$V_{in}>V_{out}$ 时比较器输出 1，$V_{in}<V_{out}$ 时比较器输出 0。

逐次比较

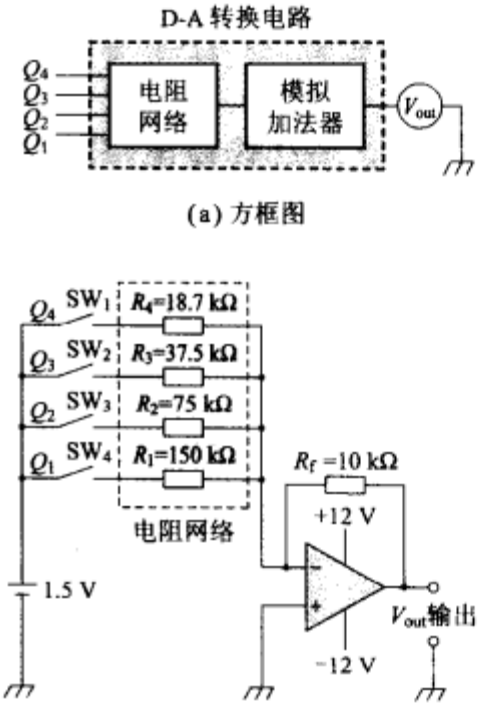


图 4.84　D-A 转换电路

这样一来，若数值分配如图 4.83(b) 所示，设 $V_{in}=1.24$V，则

① 一开始计数器处于复位状态，$V_{out}=0$。

② 比较器中 1.24V>0V，因而输出为 1。

③ 这个 1 打开 AND 门，1 个时钟脉冲进入计数器。

④ 计数器计数值增加为 0001。

⑤ 因为是 0001，根据图 4.83(b)，$V_{out}=0.1$V。

反复重复步骤①～⑤，每输入 1 个时钟脉冲，计数值增加 1，V_{out} 则依次变为 0.2V、0.3V、…、1.2V 等；

⑥ 当 V_{out} 变为 1.3V 时，1.24V<1.3V，比较器输出为 0。

⑦ AND 门因为输入为 0 而关闭，无时钟脉冲输出。

⑧ 计数器不变。

A-D 转换电路

其最终结果是将输入 V_{in} 判断为 1.3V，因而其二进制数字输出显示为 1101[见图 4.83(b)]。此即 **A-D 转换电路**的转换步骤。

D-A 转换器

在图 4.83(c)的构成中，将计数器的输出变为模拟电压，用的就是 **D-A 转换器**。图 4.84(a)是其方框图。图中，二进制输入经电阻网络、模拟加法器后变为模拟量输出。其分析方法如下。

定标

因为数字电路的表现不是 1 就是 0，因而可用模拟开关来代替它。所以，可以用二进制输入来打开、关闭开关，并经适当的电阻连接到加法器。加法器进行与计数量相符(依靠**定标**)的运算，而得到与二进制输入相当的模拟电压。这里的加法器用的是运算放大器，其具体的电路构成如图 4.84(b)所示。

25　脉冲调制解调电路

要　点

将信息变为电信号可以有效地传向远方。为此常采用将信号波搭在载波上的方法，此称之为调制。相反，从载波中提取信号则称之为解调。脉冲调制解调电路，即是以离散的数字形式进行此调制解调的电路。

解　释

□ PAM 与 PCM

调制

要进行**调制**的电信号波大多为模拟量。此模拟量是随时间连续变化的。利用第 4 章第 24 节的 A-D 转换电路，首先将原来的连续变化量，按一定的时间间隔（此称为离散）进行选点，然后检查所选点的值相对信号预计最大值所处的位置，最后将其用二进制数字表示出来。这里的选点操作称为

采样

采样，所选点的信号值称为样本。确定信号所处的位置称之

量化

为**量化**。

脉冲调制，首先像 A-D 转换那样，将信号波按一定的同步脉冲进行采样，用这些采样值来表示信号。其次，将含在

载波

信号中的信息连同一定的同步脉冲一起在采样间隙放在**载波**上发送出去。信息接收方则进行

解调

解调，用同步脉冲提取原采样值，再构成信号波形。

脉冲调制可分为模拟方式和数字方式两种。前者样本

脉冲振幅调制

PAM

的振幅是连续变化的，其具有代表性的调制方式为**脉冲振幅调制**（**PAM**：Pulse Amplitude Modulation）。后者样本的振幅是预先确定的，虽然离散但振幅保持一致，其具有代表性的

脉冲编码调制

PCM

调制方式为**脉冲编码调制**（**PCM**：Pulse Code Modulation）。

最简单的 PAM 的例子如图 4.85 所示。图 4.85(a)所示的信号波被均匀采样，其采样值分别与采样瞬间的信号幅值成比例。PAM 有双极性[见图 4.85(b)]和单极性[见图 4.85(c)]两种。前者如同信号波的幅值，有正有负。后者被有意加于某一固定的直流电平上，得到的全是正脉冲。PAM 易受调制干扰，不太使用。其优点是对于声音信号解调简单。

PCM 的构成如图 4.86 所示。PCM 和 PAM 一样都要进行采样，但是其数字化的方式不一样。PCM 的发生电路中，与 A-D 转换一样，要进行采样→量化→数字化编码（由编码器实现），用二进制数近似地表示幅值。此近似程度根据需要可以提高。经调制的编码信号可通过传送线路或无线电发射来传送。接收方用解码器将其变为二进制数后，再通过脉冲变换电路对信号进行解调，最后将不需要的高频成分用滤波器滤去，得到信号波。

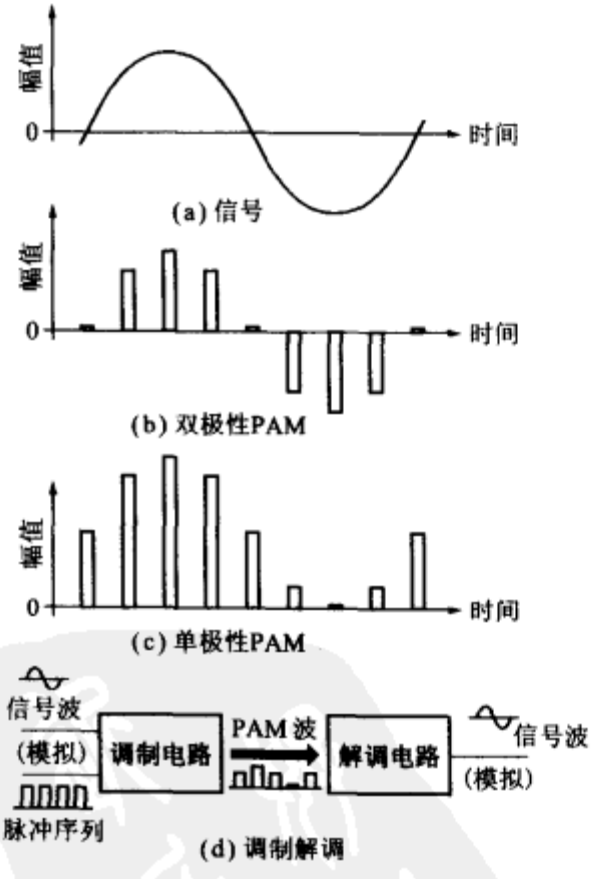


图 4.85　PAM 的例子

与 PAM 相比，PCM 的方式更具数字特征。采样过程，两者可以说是相同的，但是，PCM 在采样后通常要用 A-D 转换器对其进行二进制编码。这是在脉冲调制中将其划归为数字方式的主要原因。

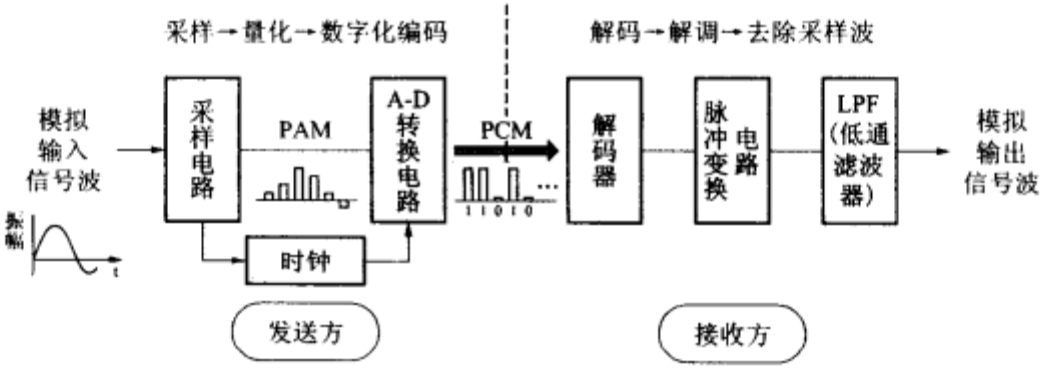


图 4.86　PCM 的构成

相关知识

◆ 采样定理

如 4-24 节所述，将连续的模拟量变为数字量时要按一定的时间间隔抽样并得到数据，这一过程称为采样。很显然，采样数目越多，原来的信号波形越能忠实地再现。

但是这里要问，样本的数目要抽到多少才能不失真地再现信号波形？根据奈奎斯特采样定理(sampling theorem)，要再现信号波所携带的信息，采样频率 f_s(Hz)至少要为信号带宽 B_m(Hz)或者说是信号中的最高频率 f_h(Hz)的 2 倍。用公式表示时，即为

$$f_s \geqslant 2B_m, \quad \text{或者 } f_s \geqslant 2f_h$$

所以，不失真的最低采样频率为 $f_s = 2B_m$，此称为奈奎斯特频率。

例　题

将模拟量变为数字量时，正确的步骤是下边哪一个？

① 采样→编码→量化　　② 量化→编码→采样

③ 采样→量化→编码　　④ 量化→采样→编码

解说　如前面相关内容所述，步骤如下：

模拟量→采样→量化→编码→数字量

答　③

26　数字钟表的构造

要　点

以使用 TTL-IC 的数字钟表的电路构成为例，对身边的数字电路的实用进行说明。

解　释

数字振荡/钟表的分频电路

时间可用对一定周期的脉冲进行计数来表示，因而数字钟表的核心是计数器电路（见本章第 23 节）。图 4.87 给出了用计数器构成钟表的例子，计数器的使用方法如下。首先要用表示 AM/PM（上、下午）的 2 进计数器。其次，众所周知小时是十二进制，因而要用 12 进计数器。分和秒是六十进制，所以可将 6 进计数器与 10 进计数器连用。对于各计数器的输出，使用 7 段 LED 作为译码器（7 段 LED 为十进制显示用的特殊译码器）。对于时、分、秒的显示，各要两只 7 段 LED 即可对计数值进行显示。

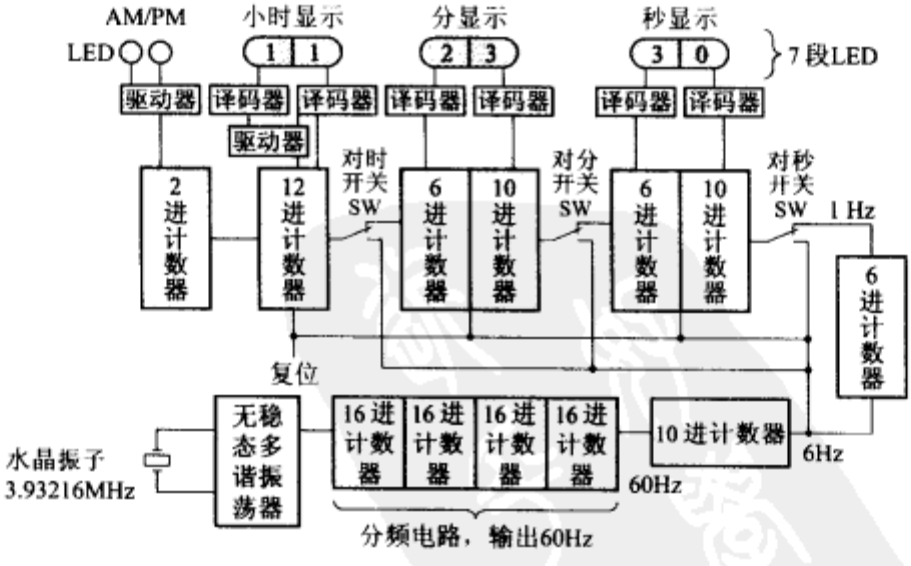


图 4.87　由计数器构成的数字钟表

图 4.87 所示计数电路的工作情况如下。首先产生一定周期的脉冲，其后每过一秒计数器加 1 并分别显示出时、分、秒。在手表等的电路中，脉冲源用的是**晶体振荡器**（振荡频

晶体振荡器

分频电路

率为 3.932 16MHz)，经 16 进计数器组成的**分频电路**，最初得到 60Hz 的脉冲。再经后续的 10 进计数器、6 进计数器，

数字脉冲

60Hz→10Hz→1Hz，即得到每秒 1 次的**数字脉冲**。使用家用交流电源(50Hz 或 60Hz)时，可用斯密特触发器将其变成脉冲后当作脉冲源使用。这时无需分频，将斯密特电路的输出送入 10 进计数器即可。但是，50Hz 时，需将后面的 6 进计数器换成 5 进计数器。

如上所述，数字钟表是以 1Hz 的脉冲为基准，1 秒 1 个脉冲，由秒、分、时、AM/PM 各计数器按顺序计数，最后得到时间。对表的时候，切换内藏的数字开关，从 10 进计数器直接引出 6Hz，即可以每秒 6 个脉冲的速率改变显示。实际制

TTL-IC

造时，计数器用计数器专用 **TTL-IC** 构成，16 进、12 进、10 进、2 进分别用的计数器 IC 为 SN793N、SN7492N、7490N、7472N。7 段译码器用 SN7447AN，开关电路用 AND、NAND、OR 门 IC。脉冲源市面有售，买来使用非常方便。

相关知识

◆ 12 进制显示

12 进计数器的真值表如图 4.88 所示。这里来看一下小时的高位显示。从真值表可知，高位显示只用于最后的 10 和 11，因此，判断时只考虑 Q_4、Q_2 同时为 1 的情形即可。

计数	Q_4	Q_3	Q_2	Q_1
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
⋮			⋮	
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1

此情况下高位显示1

图 4.88　12 进计数器的真值表

27 锁相环与频率合成器

要 点

锁相环是数字电路的应用之一，利用它可以构成频率合成器。锁相环是将输入信号与基准信号的相位进行比较，以检出的相差为根据对输出进行修正，使其频率与基准信号同步的电路。锁相环有数字锁相环与模拟锁相环之分。频率合成器用于电视和通信设备的选台电路技术，以及使用声音合成的 MIDI 的 FM 声源等中。

解 释

锁相环

比相器
压控振荡器
低通滤波器

图 4.89 给出了锁相环(PLL:Phase Locked Loop)的基本构成。PLL 大致由**比相器**(PC:Phase Comparator)、**压控振荡器**(VCO:Voltage Controlled Oscillator)和**低通滤波器**(LPF:Low Pass Filter)三电路构成。

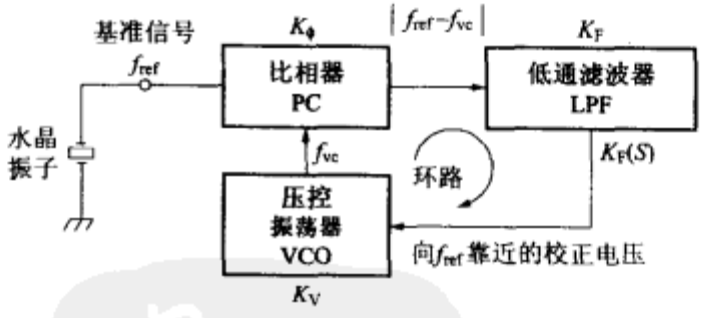


图 4.89 锁相环的构成

基准信号 f_{ref} 和 VCO 的输出信号 f_{vc} 送入 PC 比相，输出误差 $f_{ref}-f_{vc}$，再经 LPF，从 PC 的输出中提取直流成分而得到校正电压。VCO 在此校正电压的作用下使其输出信号 f_{vc} 跟随基准信号 f_{ref}。在此环路的反复作用下，VCO 的输出 f_{vc} 信号正确地与基准信号 f_{ref} 同步。环路的这种状态称为 VCO 锁定，环路锁定所需的时间称为**锁定时间**，这表示 PLL 的响应速度。这时 PLL 的**传递函数**为

锁定时间
传递函数

$$H_s=\frac{K_\phi \cdot K_V \cdot K_F(S)}{S+K_\phi \cdot K_V \cdot K_F(S)} \tag{4.14}$$

式中　K_ϕ ——比相器的增益常数，V/rad；

K_F ——滤波器的增益；

K_V ——VCO 的变换增益，rad/V·S；

$K_F(S)$ ——滤波器的传递特性。

频率合成器

频率合成器的例子如图 4.90 所示。所谓频率合成器，即是以能够产生频率稳定信号的晶体振荡器为基准进行信号合成，并能够获得任意频率且具有与晶体振荡器一样频率稳定度的信号源。这里对频率合成器作一说明。

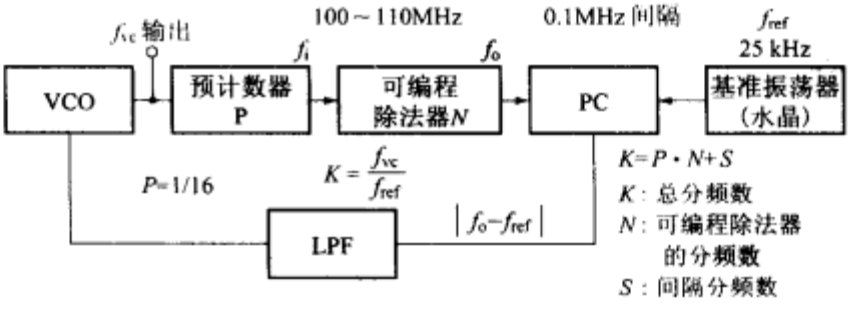


图 4.90　频率合成器

频率合成器

在 PLL 的里面再接一个可编程除法器，即可构成**频率合成器**。假设基准信号频率为 f_{ref}(Hz)，输出信号频率为 f_{vc}(Hz)，PLL 完全锁定时，式(4.15)成立，即

$$f_{ref}=\frac{f_{vc}}{K} \tag{4.15}$$

$$f_{vc}=K\cdot f_{ref} \tag{4.16}$$

式中，K 为整数(1,2,3,…)，所以 f_{vc} 可以按 f_{ref} 的整倍数进行变化。可编程除法器，对振荡器频率进行分频，使输入频率 10 倍频、100 倍频，或者说按 1∶10、1∶100 等所希望的倍率变频。因而这里是数字分频。分频是在 VCO 和 PC 之间进行，所以可以正确地改变 VCO 的振荡频率。这样一来，就能用一个基准振荡器(如水晶)得到很多个频率稳定的信号。

例如，设基准振荡器频率为 25kHz，想要得到 VCO 的振荡频率为100～110MHz(间隔为100kHz)时，式(4.15)变为

$$K=\frac{100\text{M}}{25\text{k}}=4000\text{ 倍}$$

使用计数器进行最初的 16 分频后，后面除法器的分频数则为

$$N=\frac{4000}{16}=250$$

间隔为 100kHz，要得到 100.1MHz 时

$$K=\frac{100.1\text{M}}{25\text{k}}=4004$$

这时，只需给总分频数上加 4 即可。

相关知识

◆ 脉冲数字电路中噪声的抑制

第 5 章第 14 节中，将要对电路噪声抑制进行说明，这里先对数字电路中噪声的抑制作一归纳。数字电路中产生的噪声，多发生于处理高频成分的器件的开关动作上，其原因为：

① 失调，以及反射损耗等。

② 阻抗不匹配(失配)。

③ 来自外部(如电源线)的干扰。

④ 数字电路自身噪声，以及 *LCR* 耦合噪声。

其抑制对策为：

① 查找噪声的发生源及侵入路径。

② 交流隔离。

③ 防止静电(检查地线、适当的屏蔽)。

④ 使用防噪器件。

常用的噪声抑制器件有以下几种(见图 4.91)。



图 4.91 噪声抑制器件

① 磁芯：可将高频噪声变为热。

② 三端电容器：将高频噪声引入地。

③ 各种滤波器(有电磁干扰、线间干扰时)：仅让有用的信号通过。

题外话

正因受到爱迪生器重而陷入悲剧命运的特斯拉

提起发明王爱迪生，人们都知道他是因 1882 年世界上最早在纽约的珍珠街建立发电厂，兴起直流输电电力事业而出名的。而要说到特斯拉，人们会想到他是一个踏踏实实的人物，正像电磁学中的磁感应强度的单位(T)用他的名字命名一样，他也是对电气技术作出了巨大贡献的优秀物理学家。

当时，爱迪生对活跃在欧州的特斯拉的优秀的发明能力给予了很高的评价，并邀请他到美国在爱迪生公司下工作。此时，爱迪生正在以繁荣作为自己电力事业关键的直流输电事业为目标，致力于其种种问题的研究与解决，并在这些问题的解决上，对特斯拉的才能寄予了很大的期望。但是，特斯拉来美国的动机是因为对交流的魅力及其前途抱有很大的希望，所以常常和主张直流输电的上司爱迪生的意见发生冲突，并多次发生激烈的争论。相互最终无法协调，特斯拉辞职离开了爱迪生公司，并一度失业。然而，以特斯拉的发明及专利为基础的交流输电系统的优势，不久即显现了出来。

将电气列车变为自动车的 VVVF 控制

过去在市内运行的电气列车的电机，由于速度控制及起动扭矩方面的优势而长期使用直流电动机。但是，最近由于电力电子学的进步，使用能通过自由变化(Variable)加于电动机上的电压(Voltage)和频率(Frequency)来控制交流电动机转速的 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency)控制技术，使得电车上使用的直流电动机逐渐消失，而代之以使用交流电动机。

与直流电动机相比，使用交流电动机的优点在于：无整流子及电刷而工作可靠并易于维护保养，可细微且平滑地改变电机的转速，以及优良的节能性能。

这对于电车司机来讲，就好比开汽车开的是无需操作离合器而自动换挡的自动车，完全成为一种愉快的驾驶。

第5章

电子测量

● 责任编委
扇　浩治
● 执　笔
扇　浩治

电子技术的发展可谓是一日千里。与此同时，各种测量仪器的发展也是日新月异。具有代表性的模拟仪表产品的动圈式仪表，随着数字技术的进步，已经变成为数字仪表；示波器已不再是只显示波形，而是成了既能显示波形，又能同时显示电压值、周期、测量日期等各种参数和数据，还能进行画面硬复制等的多功能仪器。

本章将介绍随着技术发展而出现的新型仪器的使用方法及电子测量的基本知识，还将说明如何根据测量目的选用测量仪器。由于数字技术已经相当发达，本章也将对数字信号和高频信号的各种测量以及瞬变电子现象各种参量的记录方法进行适当的介绍。读者在学习其他章节时碰到与测量有关的不懂之处，可以返回来阅读本章内容。

1　测量与误差

要　点

人们的周围存在着各种各样的量。从大的方面分类，可分为连续量（模拟量）和不连续量（数字量）两大类。所谓测量就是对这些量进行计量。要测量就会出现误差。误差表示测量值偏离真实值的程度。

解　释

模拟量与数字量

模拟量

所谓**模拟量**是指连续变化的量，如时间、质量、电压和电流等大小连续变化的量就是模拟量。“这件工作竟用了1小时37分”这类非整数的量，也表明它是模拟量。人们周围有很多量都是这样的模拟量。

数字量

数字量则表示不连续的量。例如，开关接通还是没接通，比规定的电压高（H）还是低（L）等。“开关似通非通”之类的中间量，在数字量中是不存在的（见图5.1）。

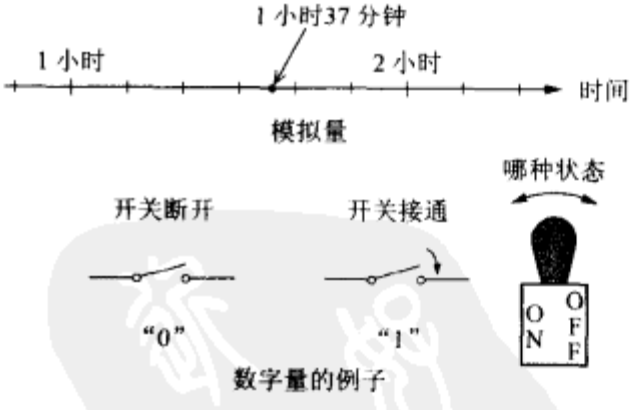


图5.1　数字量和模拟量

误差的原因与校正

测量

测量就是测定某个量。用测量仪表测量电压和电流等得到的值未必是它的真实值。常常不是比真实值大就是比真实值小，二者之差称为**误差**（error），用 ε 表示。产生误差的原因如表5.1所示。

误差

减小误差的方法，首先是减小人为误差。为此，必须有充分的睡眠时间，平心静气地进行测量。

表 5.1 产生误差的原因

原 因	实 例
人为误差	• 读错数字 • 因人而异的读数误差 • 由于紧张或疲劳而读错
仪器性能	• 仪器运动部分的摩擦阻力及部件的劣化所造成的误差 • 数字仪表的 A-D、D-A 转换误差
使用环境的影响	• 测量场所的温度、湿度、气压的不同或上述环境参数变化大的场所 • 在接近电波或强磁通量的地方

误差 ε、测量值 M 和真实值 T 之间的关系如下：

$$\varepsilon = M - T \tag{5.1}$$

相对误差

误差与真实值相比所占的比例称为**相对误差** ε_0。

$$\varepsilon_0 = \frac{M-T}{T} \times 100\ (\%) \tag{5.2}$$

图 5.2 中，设电路中流过 10.00mA 的电流，而从一般仪表上读得的值为 10.20mA，则误差为 $\varepsilon = 0.20$mA，相对误差 ε_0 为

$$\varepsilon_0 = \frac{0.20}{10.00} \times 100\% = 2\%$$

校正率

如果该误差是仪器的总误差，那么对指示值引入 0.20mA 的校正量就可以了。也就是说，校正值为 $\alpha = T - M$，校正率为

$$\alpha_0 = \frac{T-M}{M} \times 100\%$$

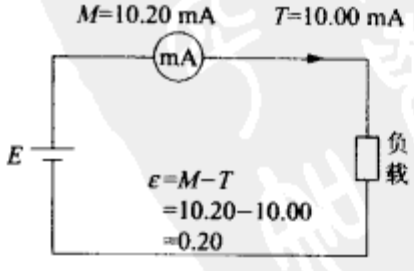


图 5.2 求误差

2　仪表的分类与使用

要　点

仪表可分为模拟仪表和数字仪表。其区别在于它是用指针指示电压或电流的值，还是通过模-数转换后以数字显示。本节先来研究模拟仪表。

解　释

模拟仪表的分类

模拟仪表是指将电学量变成指针的偏转量，直接读取偏转值的仪表，指针式电压表和电流表即为这种仪表。表5.2所示为模拟仪表按工作原理进行的分类。在七类具有代表性的仪表中，最通用的是动圈式仪表以及由动圈式仪表组合而成的热电式和整流式仪表。

表5.2　模拟仪表的工作原理

符　号	种　类	工作原理与特点	电　路	应　用
	动圈式	磁铁磁通量与动圈磁通量之间的反作用力	直流	电压表 万用表
	动铁式	作用于可动铁片的电磁力，可测量频率小于1kHz的量	只用于交流	电压表 电流表
	整流式	整流器＋动圈式 不适于测量0.1V以下的量	交流 直流	电压表 电流表
	电动式	基于固定线圈与动圈之间的电磁力	交流 直流	电流表 电压表
	热电式	热电偶＋动圈式 测量频率可达100MHz	交流 直流	电流表 功率表
	静电式	响应慢，但可测量高电压（达500kV）	交流 电流	电压表
	感应式	涡流与交链磁通之间的反作用，坚固耐用	交流	功率表

模拟仪表的使用方法

图5.3、图5.4分别为模拟仪表的外观及仪表面板。有关仪表的各种符号、误差范围、仪表放置方法、适用的电路及仪表的分类分别示于表5.3、表5.4及表5.5。



图 5.3 模拟仪表的外观

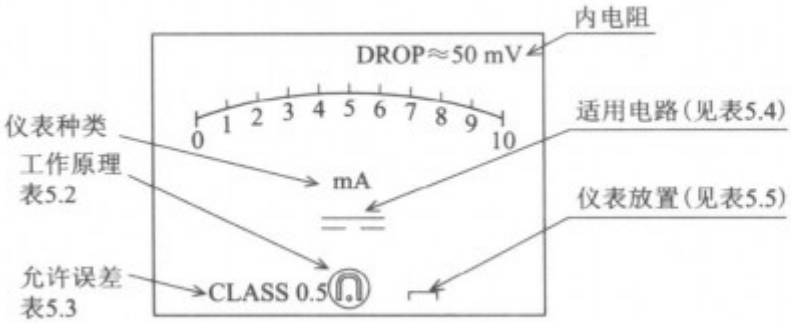


图 5.4 模拟仪表的面板

表 5.3 指针式仪表的允许误差

等 级	允许误差/%	主 要 用 途
0.2	±0.2	辅助标准器,校正用
0.5	±0.5	精密级,工业用
1.0	±1.0	0.5 级精密测量用
1.5	±1.5	一般测量用
2.5	±2.5	配电盘用

表 5.4 适用电路

电路	符号
直流用	⎓
交流用	~
交直两用	≂
平衡三相用	≋

表 5.5 仪表放置

放置方法(安装)	符号
垂直	⊥
水平	⊓
倾斜(60°)	∠60°

关于 1000Ω/V 和 DROP≈50mV

图 5.4 所示表盘右上角上书写的 DROP≈50mV 表示电流计的内部电阻。电压表的场合下写成 1000Ω/V 的形式，这也表示的是内部电阻。

1000Ω/V：表示接线端每 1V 电压为 1000Ω。

当为 5V 接线端时，内阻为 $1000\times5=5000(\Omega)$

DROP≈50mV：表示在 50mV 时的满刻度电流。由此可以通过计算求得内电阻。

当为 300mA 接线端时，内阻为 $\frac{50\text{mV}}{300\text{mA}}\approx0.167\Omega$

3　动圈式仪表

要　点

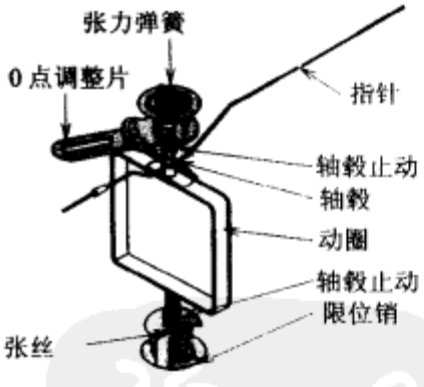
作为指针式仪表的代表，动圈式仪表是利用永磁铁的磁通与流过线圈的电流的磁通相互作用进行工作的。本节将学习动圈式仪表的特点，并利用它来学习模拟式万用表的知识。

解　释

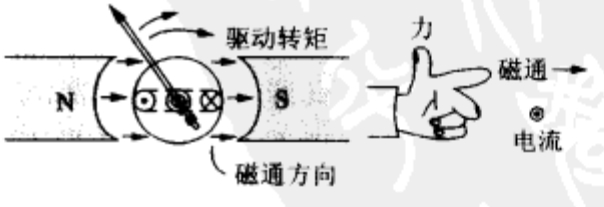
动圈式仪表

动圈式仪表的结构

动圈式仪表的结构示于图 5.5。当被测电流流过线圈时，线圈就会产生磁通量，与永磁铁之间产生驱动转矩。这个驱动转矩使线圈转动，并稳定在与张力弹簧的控制转矩相平衡的位置。这时的指针偏转量与被测电流成正比。所以它的表盘刻度是均匀刻度。



(a) 仪表构造(张丝式)(横河电机提供)



(b) 转动方向

图 5.5　动圈式仪表结构

相关知识

◆ 模拟万用表的结构及使用方法

动圈式仪表中最常用的是万用表。图 5.6 所示为万用表的外观。它是一种可用一块表测量直流电压、直流电流、交流电压、电阻等参数的仪表，又称为电路表。从它的名称可以知道，它可用于对电子线路检查等广泛的测量。但由于仪表仅为 2.5 级，所以不适用于精密测量，不过用于线路检查已足够了。对于电气电子技术人员来说，使用万用表就像医生使用听诊器一样。

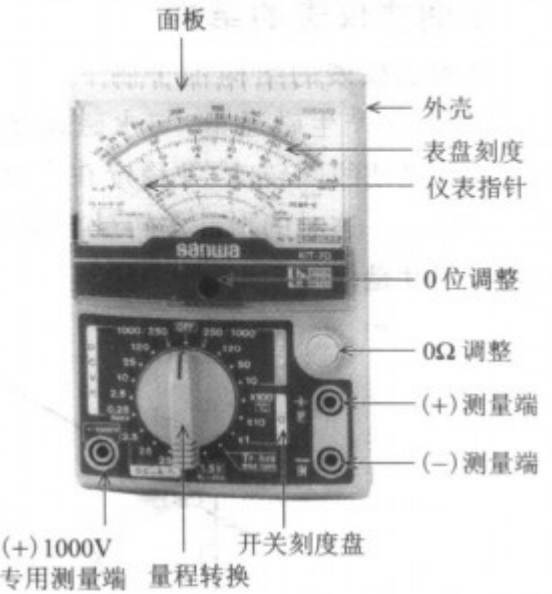


图 5.6　万用表的外形及其各部分的名称

万用表是由用于测量直流电压和交流电压的倍率器、测量直流电流所需的分流器以及测量交流电压和交流电流所需的二极管等组成的。

◆ 使用方法

① 测量准备：仪表调零(机械调零)。

使用万用表之前，用旋具调节 0 位调整器使指针位置停在左端的零点。测量之前先看一下，如果正确则不需调整。如果零位不正确，所有的测量值均会出现误差，所以必须特别注意。

② 测量直流电压(DCV)(见图 5.7)：将万用表设置成在指针从中心偏向左的位置处读取测量示值。

测量直流电压时，万用表应与测量电路并联连接。由于是直流，所以应注意极性。

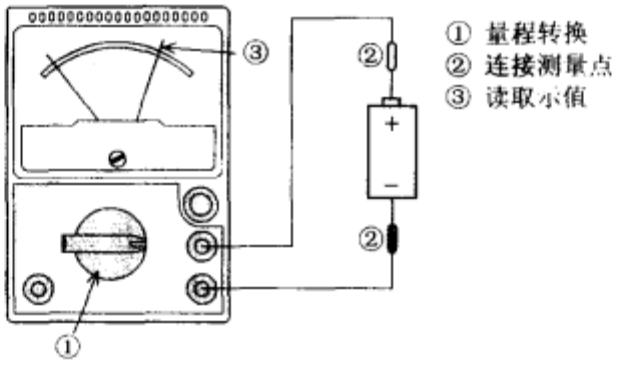


图 5.7 测量直流电压

③ 测量电阻(Ω)(见图 5.8)：

• 0Ω 调整(电气调零)。首先将量程开关转换到电阻挡，然后将测量线短接，调节调 0Ω 旋钮使指针指到右端的 0Ω 处。在重复进行测量或转换量程时，应每次都进行调零。如果调零旋钮向右转到底而不能使指针到达 0Ω 时，表明万用表内装电池已耗尽，需更换新电池。

• 测量与注意事项。调零后，将测量线与被测电阻的两端相连，读取电阻值。测量时，由于测量线的极性与内装电池的极性相反(红线为负极、黑线为正极)，所以在用于测量二极管等器件时应特别注意。

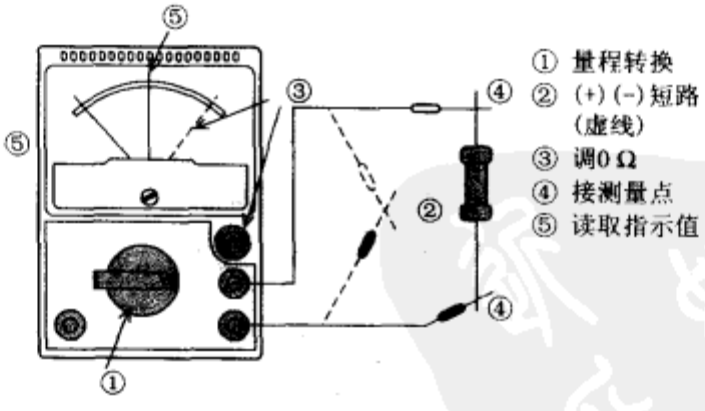


图 5.8 电阻的测量

4　数字万用表的构造

要　点

数字万用表是万用表中的一种，是一种便携式数字万用表(DMM)。测量范围为直流电压、直流电流、交流电压、交流电流及电阻，由于它是用数字表示测量值，所以在读数时没有误差。本节将学习数字万用表以及它的结构和使用方法。

解　释

数字万用表

数字万用表的外观及其主要名称示于图 5.9。数字万用表直接用数字表示测量值，所以如果仪表有存储功能和输出端，即可以将数据读入微机，因而使数字仪表获得了迅速发展。由于测量电压、电流、功率、电阻等多种基本测量功能集于一块表，故可以用于现场及实验室等多种场合的测量。其体积大小也是各种各样的，小到袖珍万用表，大到台式仪器。图 5.9 是袖珍型万用表。



图 5.9　数字万用表的外观及其主要名称

数字万用表的结构与使用方法

数字万用表的结构示于图 5.10。测量中通过转换量程开关连接于内部电路的各个部分。

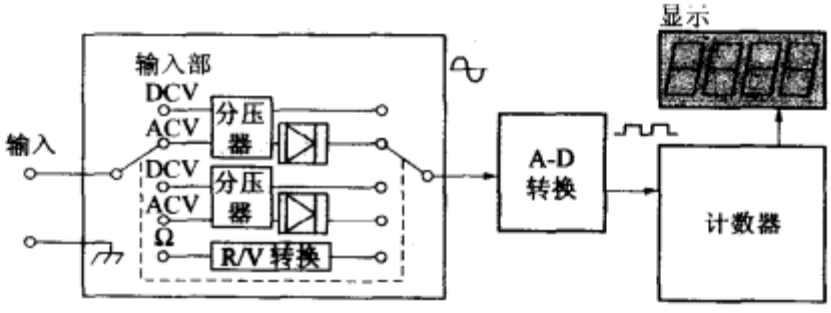
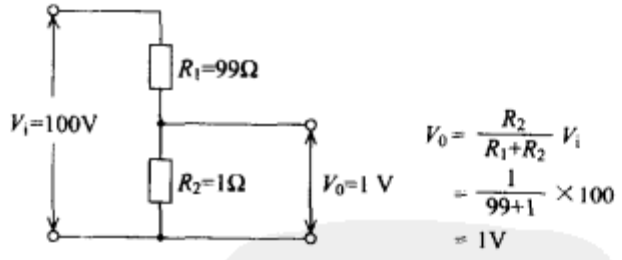


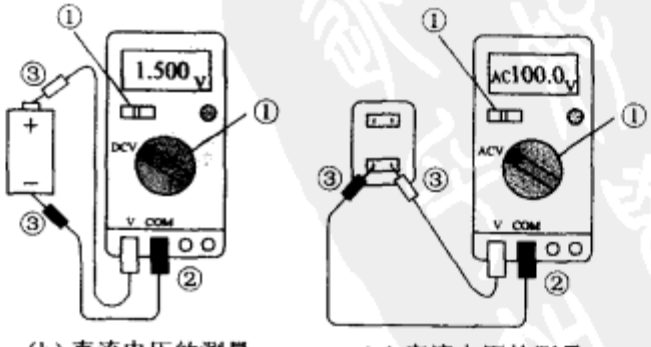
图 5.10　数字万用表的基本构造

直流/交流电压的测量

数字万用表可根据测量电压的大小自动选择合适的量程。量程由分压器来划分，分压器由不同的电阻构成，如图 5.11(a)所示。测量交流时，用整流电路进行 AC-DC 转换。



(a) 分压原理



(b) 直流电压的测量　　(c) 交流电压的测量

图 5.11　电压的测量

测量直流的步骤如图 5.11(b)所示，测量交流的步骤如图5.11(c)所示。由于是测量电压，所以测量时与电源并联。

测量直流电压时还应注意正、负极性。

① 打开电源，将量程旋钮转到“DCV”/“ACV”位置。

② 将黑色引线接“COM”端，红色引线接“V”端。

③ 将测量线的端部接被测电路，并读取测量值。

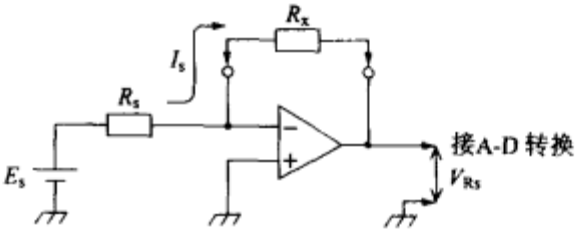
电阻的测量

电阻的测量如图 5.12 所示，它是以内装电池为电源，使电流流过被测电阻，通过测量电阻的端电压来计算求得电阻值。其测量步骤如图 5.12(b)、图 5.12(c)所示。Ω 挡除可测量电阻外，还可以用于检查线路是否导通或进行二极管等元件的检查。

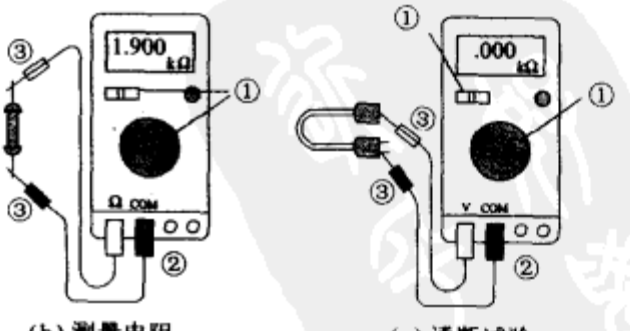
① 打开电源，将量程切换开关转到“Ω”挡；

② 测量线的黑色引线端接“COM”端，红色引线端接“Ω”端；

③ 将测量线的端部接到被测电路，并读取测量值。



(a) 电阻表的原理



(b) 测量电阻　　(c) 通断试验

图 5.12　电阻的测量

5　高频电流的性质与测量

要　点

所谓高频是指频率约在20 000Hz以上的信号。在高频段，由于出现诸如集肤效应等高频特有的性质，电路将会受到各种制约。

解　释

高　频

高频
音频

交流信号包括很宽的范围，通常所说的**高频**是指频率高于**音频**的信号。音频范围为20 000Hz以下，所以高于此频率的信号称为高频（见图5.13）。

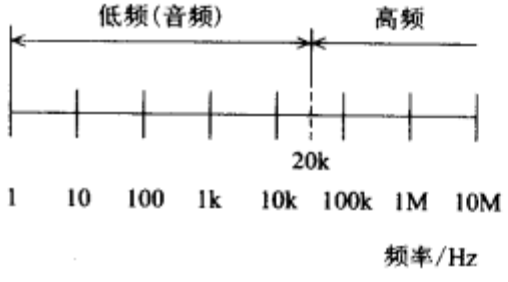


图5.13　低频与高频

用热电式电流表测量高频电流

热电偶
热电式电流表

热电偶是一种不易受高频影响的元件。利用热电偶来测量电流的仪表即为**热电式电流表**。热电式电流表的外观示于图5.14，接线示于图5.15。

这种仪表是热电偶和动圈式仪表的组合。被测电流流过热丝，热电偶把温度的变化变成热电势，用动圈式仪表进行测量。热电式电流表的特点及注意事项如下：

① 由于是热量的转换，所以指示值为有效值。

② 0.5级仪表测量频率可达5MHz，1.0级仪表可达7MHz。

③ 温度的升高与电流的平方成正比，所以电流表表盘刻度为平方刻度。

④ 为防止热电偶损坏，测量量程应预置在“短路”挡（SHORT），再缓慢地转到小数值挡。

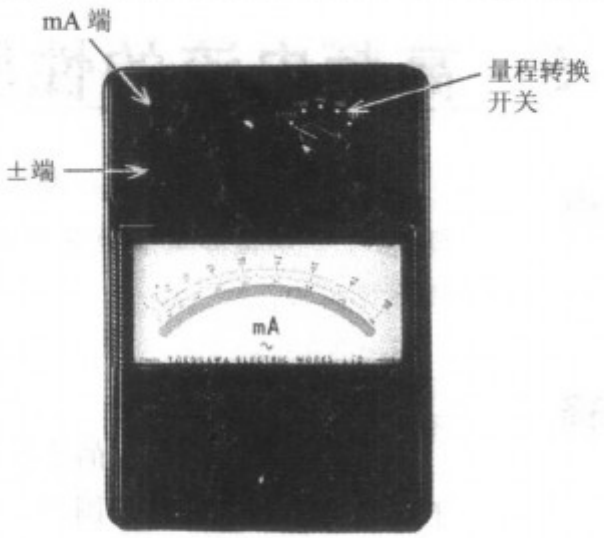


图 5.14　热电式电流表的外观

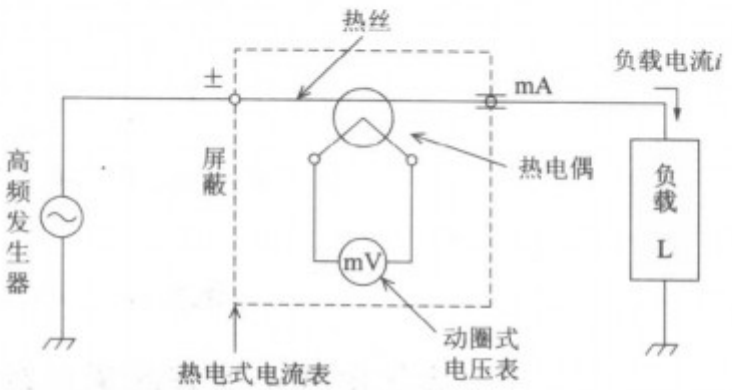


图 5.15　用热电式电流表测量高频电流

⑤ 因为用热电偶转换电流，所以指针变化速度缓慢。注意不应着急，等一会儿再读取数据。

⑥ 该电流表是全屏蔽式，测量端标有“±”的为屏蔽端。因而接入负载时必须接到“mA”端上。不然，会受到杂散电容的影响而损坏热电偶。

相关知识

◆ 集肤效应

与直流相比，频率越高则导体的电阻值越大，这是集肤效应的影响。集肤效应就是频率越高，电流越向导体的表层集中，而导体的中心却少有电流流过。

由于集肤效应，通过电流的有效截面积减少，因而电阻值增大（见图 5.16）。

◆ 残余阻抗

在高频电路中，即使是一根导线也存在电阻和电感，因而使导线的周围产生磁通。频率越高，它对电路的影响就越大，成为残余阻抗或杂散电感（见图 5.17）。

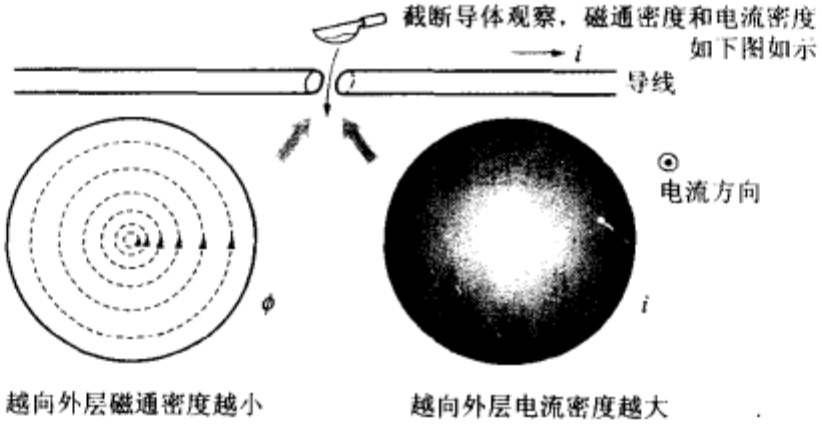


图 5.16　集肤效应

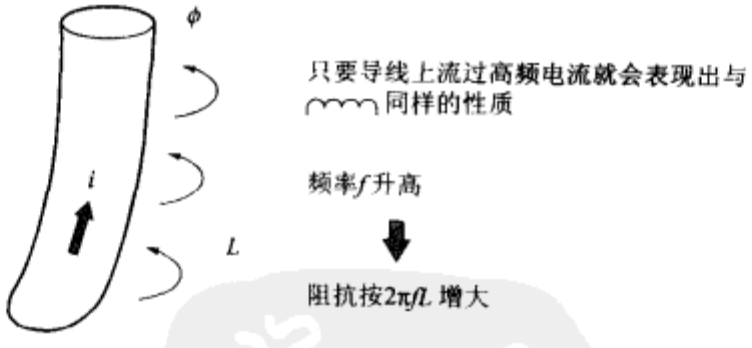


图 5.17　残余阻抗

6　电子电压表

要　点

为了在高频电路中测量电压，就必须具有高的输入阻抗，以防止对电路条件产生影响。还必须能测量微小的电压。电子电压表可以满足这些条件，可以用在高频下的高电压测量中。

解　释

电子电压表

电子电压表的结构

图5.18所示为**电子电压表**的外观，图5.19所示为其电路。交流电压表有两种类型，一种为整流型，它是先将交流电压进行检波、整流，再将直流信号放大后进入动圈式仪表来完成测量的；另一种为交流高灵敏度型，它是将输入信号首先进行交流放大，然后经检波再送入动圈式仪表来测量。可测量的额定值随装置而异，大致测量范围列于表5.6中。



图5.18　电子电压表的外观

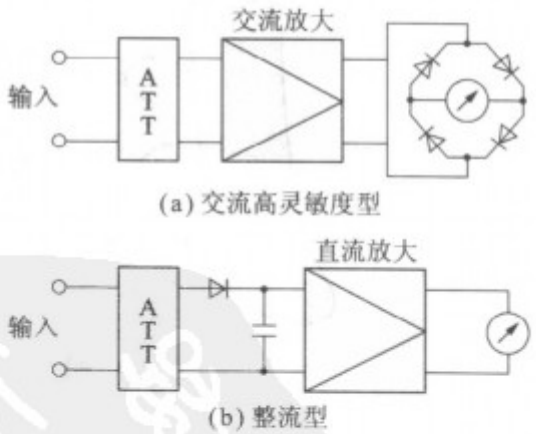


图5.19　电子电压表的电路

表5.6　电子电压表的主要测量范围

项　目	测　量　范　围
频率特性	5Hz～10MHz
测量电压	300μV～500V
(12个量程)	−70～40dB
输入阻抗	1～10MΩ以上

续表 5.6

项 目	测 量 范 围
指示精度	满量程的±1.5%～3.0%
放大器增益	为 60～70dB
输出阻抗	600Ω
示值方式	平均值指示/有效值指示
输入通道	1 通道/2 通道

峰值

峰值(P 型)电子电压表

另外，还有指示**峰值**的电子电压表。这种电子电压表称为**峰值(P 型)电子电压表**。

相关知识

◆ 分贝(dB)

分贝是表示电压增益或功率增益所使用的单位。用分贝作为单位表示的放大量或衰减量是个相对值，它有利于与其他值进行比较。电子电压表的 dBV 刻度是以 1V 作为 0dB 将测量值对 1V 的倍数按 dB 数来标刻的。例如，输入 1V 得到 100V 输出，则 100V 为 1V 的 100 倍。将它代入电压增益公式，即为

$$G_{vv}=20\log\frac{e_o}{e_i}=20\log\frac{100}{1}=40(\text{dBV})$$

电子电压表的 dBm 刻度是在输出阻抗为 600Ω 时，以消耗的功率为 1mW 时的电压 0.775V 为基准电平 0dB 来标刻度的。例如，某个测量值为 77.5mV，则其衰减量为 1/10，代入电压增益公式则可得到

$$G_{vm}=20\log\frac{e_o}{e_i}=20\log\frac{0.0775}{0.775}=-20(\text{dBm})$$

用电子电压表进行测量，并不需要进行以上计算，而是直接读出增益数值。

◆ 放大电路频率特性的测量

测量频率特性的接线方式如图 5.20 所示。这是一个双通道式电子电压表的例子，可以同时测量 L 和 R 两个通道的信号。图 5.20 所示为采用“GND”模式测量。但有时由于放大器输出端的原因，电子电压表无法与 L 和 R 的“地”端连接。这时可采用“断开”(OPEN)方式，用导线将电子电压表和放大器的“地”端连接起来。

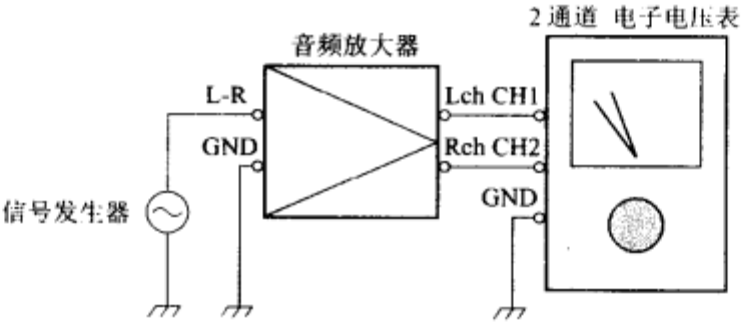


图 5.20　放大器增益的测量

7 数字频率计

要 点

数字频率计是测量交流信号频率的仪器。由于脉冲电路和数字电路的发展，已经有了测量精度高、可测高达微波段频率的数字频率计。此外，还有许多既能测量频率又能测量周期和时间间隔的通用频率计。本节介绍数字频率计的构造与测量方法。

解 释

数字频率计的构造

频率
频率计

频率是单位时间(1s)内信号周期性重复的次数。**频率计**能产生脉宽为单位时间(1s)的标准信号，并对该单位时间内信号波形的重复次数进行计数后，用 LED 显示成数字。

图 5.21 是数字频率计的外观，图 5.22(a)、(b)为它的电路框图及其各部分的波形。当输入端加上被测信号时，ATT 对信号进行限幅，然后经过放大和整形，送入主门电路。此时的整形可采用第 4 章第 4 节中学过的**施密特触发电路**进行脉冲转换，使得主门计数电路正确地工作。

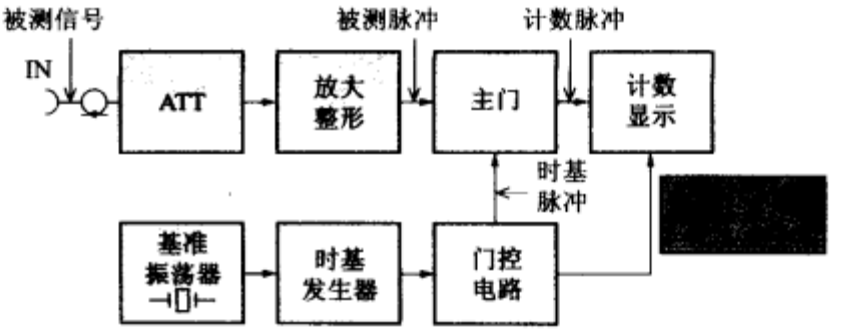
施密特触发电路

另一方面，基准振荡电路所产生的信号，按照形成 1ms、1s 等标准时间脉宽多次进行 10 分频，然后送入门控电路。该电路是影响数字频率计性能的关键电路之一，它产生标准的门控时间，一般都采用晶体振荡器。不同装置使用的晶体有 10MHz、1MHz、100kHz 等多种。门控电路是控制门电路开、闭的计时电路。此外，门控电路还具有送入门信号之前使计数电路复位和保持计数显示时间的功能。

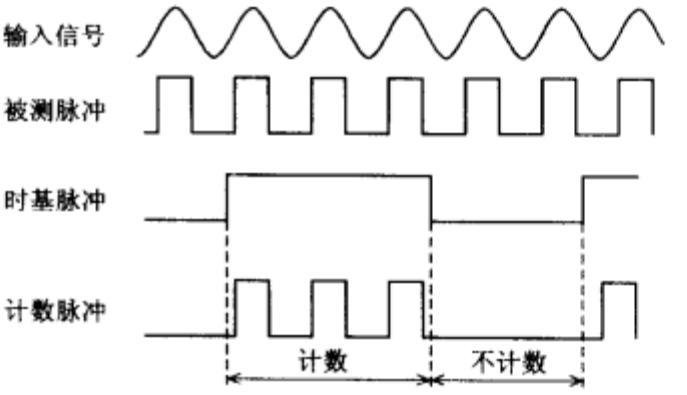


图 5.21 数字频率计的外观

下面再来看主门电路。该电路只允许被测信号在主门打开的时间内(如 1s)通过，并送入计数显示电路。计数显示电路对从门电路送来的信号进行计数后送到 7 段数码显示管 LED 进行显示。



(a) 基本电路构成



(b) 输出波形

图 5.22　数字频率计

数字频率计的误差

如果采用稳定的标准振荡器，频率计的测量结果应该是非常准确的。但是，门脉冲与输入信号间的相位差，有时会造成**1个计数误差**。如图5.23所示，信号A的计数结果为4，而信号B的计数结果为5，后者比前者多出1个。

1个计数误差

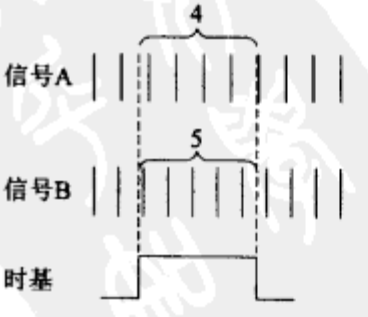


图 5.23　一个计数误差

8 信号发生器

要 点

信号发生器是用作电子设备调试的信号源，它能产生三角波、正弦波、方波等多种波形，广泛应用于从音频到高频的各种电子设备中。其电路方式很多，既有迄今仍在使用的模拟式，也有利用数字技术的合成器方式。

解 释

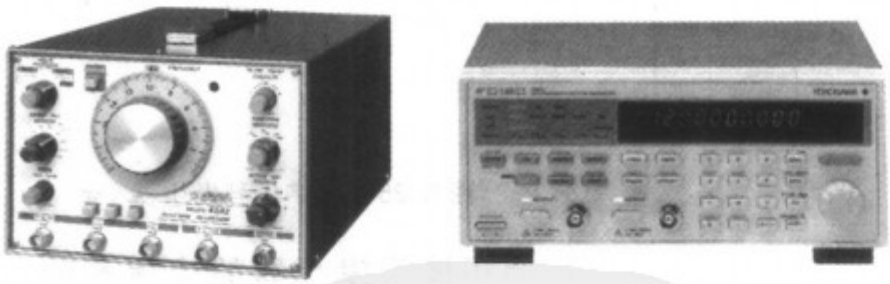
信号发生器
触发功能
门控功能

信号发生器

信号发生器是一种可输出正弦波、三角波、方波、锯齿波、脉冲波等多种波形，并有**触发功能**和**门控功能**的多用信号源；也是一种信号频率、振幅、偏置电压、相位、占空比等参数可任意设定的振荡器。

模拟式
锁相式
数字式

信号发生器大致可分为**模拟式、锁相式、数字式**等三种。图 5.24(a)、(b)所示为模拟式和数字式信号发生器的外观。



(a) 模拟式　　(b) 数字式

图 5.24　信号发生器的外观

数字式信号发生器

图 5.25 所示为信号发生器的基本电路构成。它的工作原理是，首先 CPU 使时钟停止，把需要输出的波形(正弦波或三角波)写入波形存储器。然后启动时钟并使 DDS 工作，即可输出预先设定频率的波形。在输出方波的情况下，方波比较电路将正弦波变成方波，同时还同步地输出其他各种波形。所需的波形和振幅由输出电路设定，并从 OUTPUT 端输出。

DDS

DDS

DDS(Direct Digital Synthesizer)是指直接数字合成振荡器。如图5.25所示，它由地址运算器、波形存储器、D-A转换器等部分组成。如将基准时钟输入到地址运算器，地址输出信号便进入波形存储器。由于波形存储器中记忆了1个周期的波形，所以波形存储器的地址就是波形的相位。波形存储中的数据按基准时钟同步调出后，经D-A转换器和LPF(低通滤波器)转换成模拟波形后输出。

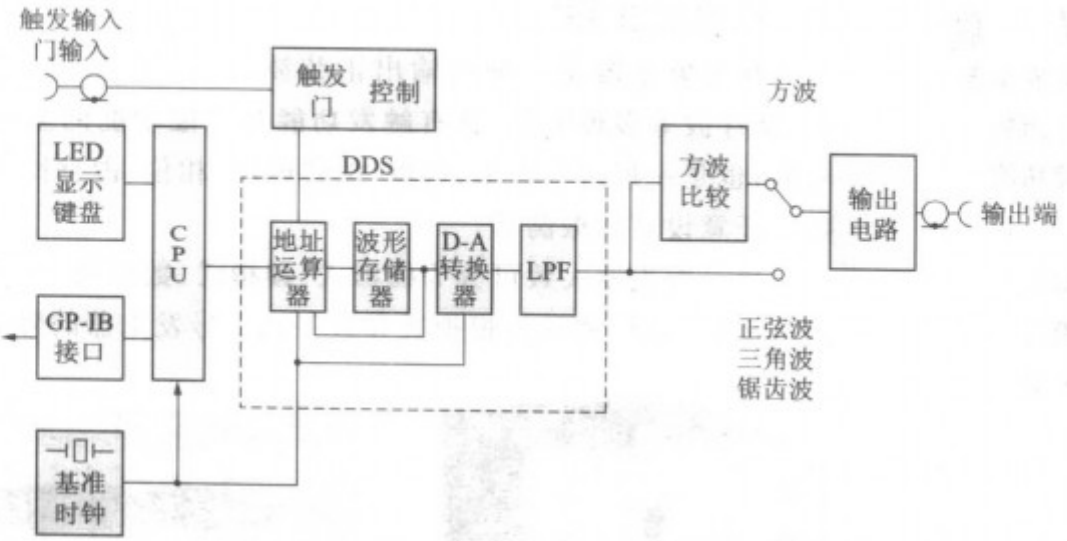


图5.25　数字信号发生器

使用信号发生器的注意事项

① 输出端的阻抗为50Ω。为了使仪器既可用于低频也能用于高频，所以输出端必须使用同轴电缆(见图5.26)。

② 由于受输出电压定义和负载的影响，当输出阻抗定为50Ω时，如果外接高阻负载，则输出电压可能会升高到2倍。

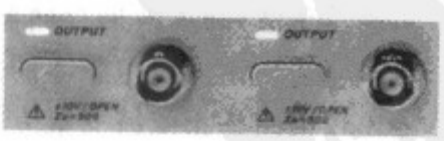


图5.26　输出端

9 示波器

要 点

示波器是观测电信号波形与振荡的仪器。它能从直流到很宽的频带内观测信号波形，同时还可以测量周期、频率、电压等参数。示波器有阴极射线管示波器和数字示波器两类，可根据不同用途来选用。

解 释

阴极射线管
示波器
垂直偏转板
水平偏转板
电子枪
电子束

阴极射线管示波器

图 5.27 所示为**阴极射线管**(CRT：Cathod-Ray Tube)**示波器**的外观，图 5.28 所示为显示的波形。现在来看它的工作原理。由于**垂直偏转板**和**水平偏转板**上电压所产生的静电力的作用，使 CRT **电子枪**发射的**电子束**(阴极射线)发生偏转，当碰到荧光屏时，即使其发光。图 5.28(a)中，如只在垂直偏转板上加正弦波信号(被测信号)，电子束只能作纵向摆动，屏上只显示一条纵向直线。如果同时在水平偏转板上加上锯齿波信号，使之产生水平方向的偏转，则示波器上就会显示出正弦波信号的波形，如图 5.28(b)所示。水平偏转板上所加的锯齿波信号称为**扫描信号**。当扫描信号与输入信号的周期成整数倍时(见图 5.29)，示波屏上即可观察到静止的波形。扫描信号与输入信号的同步可由改变扫描信号的周期来达到。

扫描信号

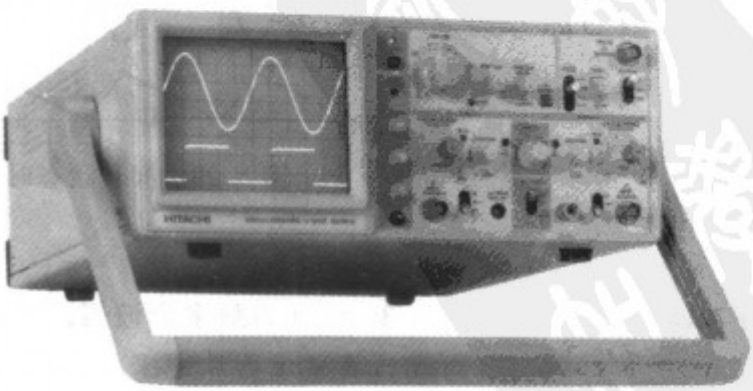
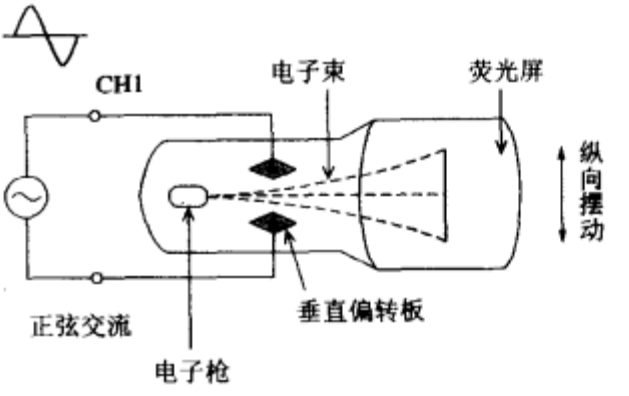
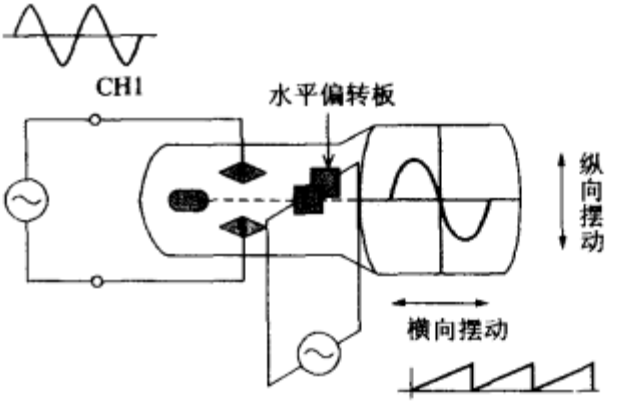


图 5.27 示波器的外观



(a) 仅在垂直偏转板上加信号



如在水平偏转板上加上锯齿波(扫描)，即可看到正弦波

(b) 水平、垂直方向分别加上相应信号

图 5.28　示波器的结构(单通道)

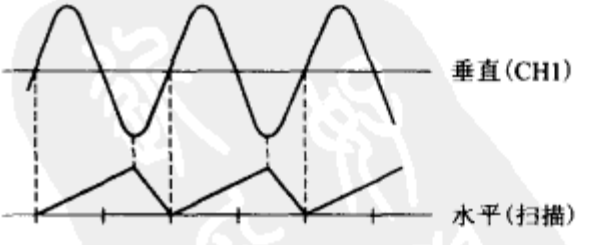


图 5.29　同步状态时的波形

数字示波器

数字示波器

图 5.30 所示为**数字示波器**的外观，图 5.31 所示为它的电路构成。其显示器从原来的阴极射线管发展到彩色 TFT 液晶，示波器的体积也大大减小了。TFT 是 Thin Film Transistor 的缩写。图 5.27 和图 5.30 都是数字存储式示波

器，可以记忆多个波形。输入信号的 ACM 存储器中每个波形的存储数据为 2k 字(显示 1.5k 字)。



图 5.30 数字存储示波器

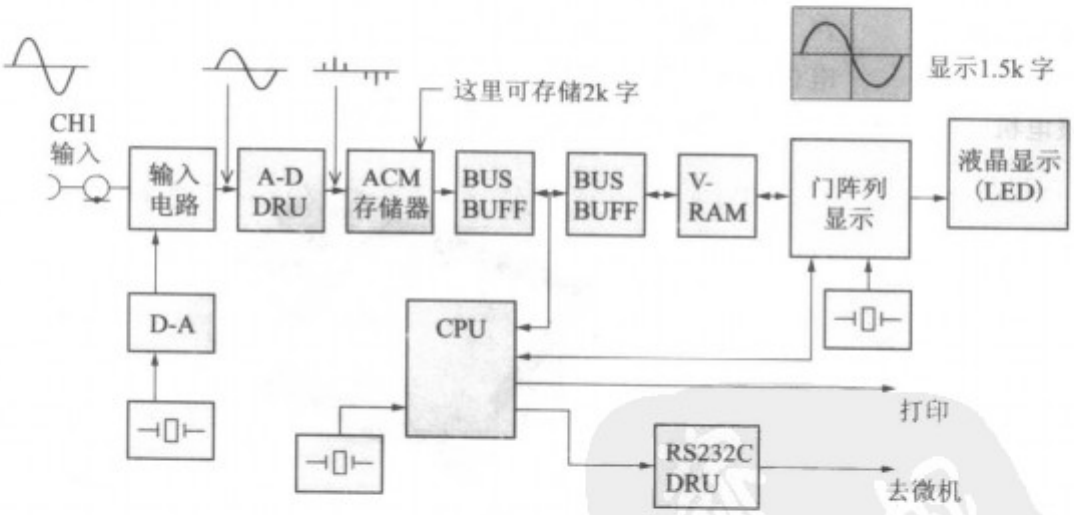


图 5.31 单通道的电路构成

数字示波器的特点

因数字示波器对输入信号进行了数字处理，所以它既能将数据解析后以数字形式显示出来，又能通过 GP-IB 或 RS232C 等接口电路将数据送入计算机，进行表格计算及图形显示等数据处理。

10　X-Y 绘图机和 X-Y 记录仪

要　点

X-Y 记录仪是自动地记录函数图形的仪器，当把两个输入电压作为 x 和 y 时，则变量 x 所决定的函数 $y(y=f(x))$ 的图形就自动地记录在方格纸上。X-Y 绘图机则是作为通用计算机的终端所出现的设备，它既可用于绘制曲线或表格，也可作为计算机 CAD 绘图机。

解　释

X-Y 记录仪

图 5.32 所示为 X-Y 记录仪的外观，图 5.33 所示为其原理。如果给记录仪输入两个电压作为 X 和 Y，X-Y 记录仪就能在方格纸上自动记录变量 x 所决定的函数 $y(y=f(x))$ 的图形。X 轴和 Y 轴分别带有各自独立的**自动平衡电位差计**，其输出信号用于控制**伺服电机**，使记录笔运动到 X 轴和 Y 轴的平衡位置，以实现记录，如记录磁性体的 B-H

自动平衡电位差计

伺服电机



图 5.32　X-Y 记录仪的外观

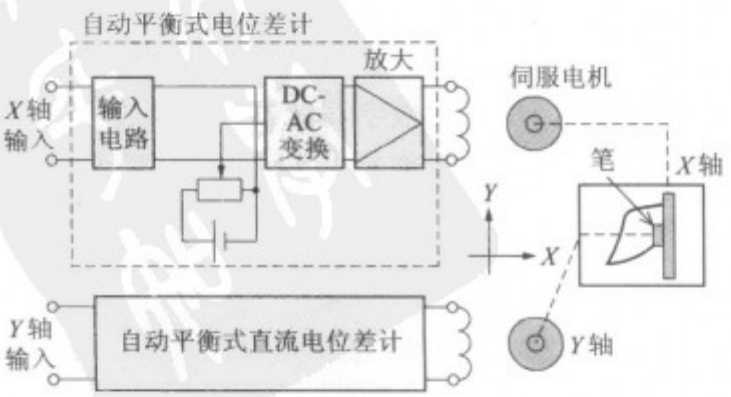


图 5.33　X-Y 记录仪的原理

曲线、电动机励磁电流与速度的特性曲线等。

X-Y 绘图机

静电式绘图机
喷墨式绘图机
笔式绘图机
CAD

X-Y 绘图机有应用复印机原理的**静电式绘图机**、采用喷射油墨微粒绘图的**喷墨式绘图机**及用笔绘图的**笔式绘图机**等。计算机 **CAD** 常用的绘图机多为 A_3 纸规格的笔式绘图机。这里介绍笔式 X-Y 绘图机。图 5.34 所示为 X-Y 绘图机的外观，图 5.35 是它的原理。随着计算机的普及，绘图机作为 CAD 的绘图设备已迅速得到普及。

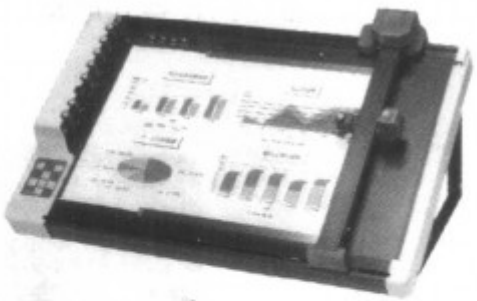


图 5.34 X-Y 绘图机的外观

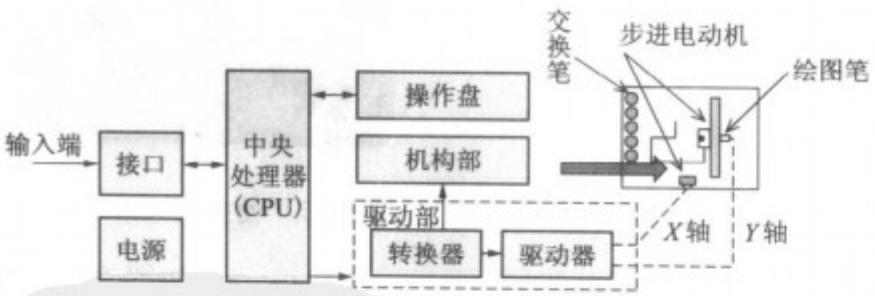


图 5.35 X-Y 绘图机的原理

X-Y 绘图机由与外部连接的接口、控制操作盘、转换器和驱动电路等的控制电路，以及使绘图笔运动的驱动电路所组成。绘图速度一般最高为 500mm/s。笔的移动方向如图 5.36 所示，有 8 个方向，利用**步进电动机**（stepping motor）使笔移动。步进电动机用脉冲信号驱动，1 个脉冲可使笔移动 0.025mm。

步进电动机

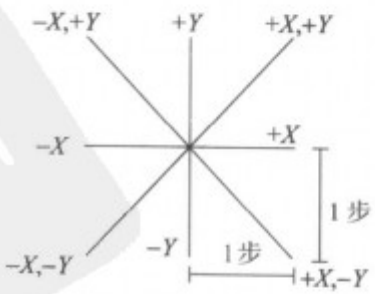


图 5.36 绘图笔的移动方向

11　各种电桥

要　点

电阻、线圈的电感、电容器的电容等的测量通常采用电桥。测量电阻时用惠斯通电桥；测量 L、C 时用交流电桥。

解　释

惠斯通电桥

惠斯通电桥

惠斯通电桥是用于测量 1Ω～1MΩ 电阻的仪器。图5.37是现场常用的便携式电桥的外观，图 5.38 是电桥的原理。

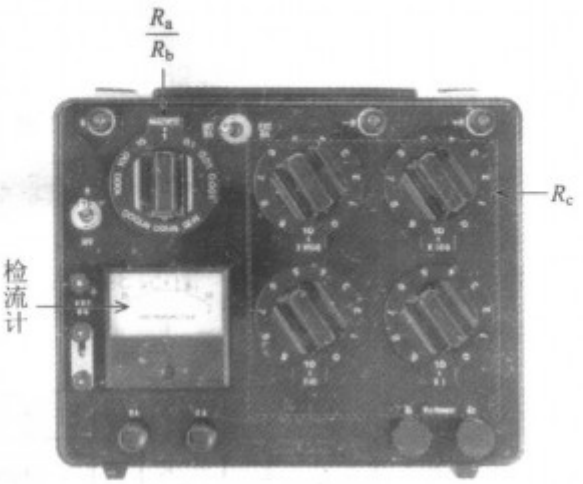


图 5.37　便携式惠斯通电桥的外观

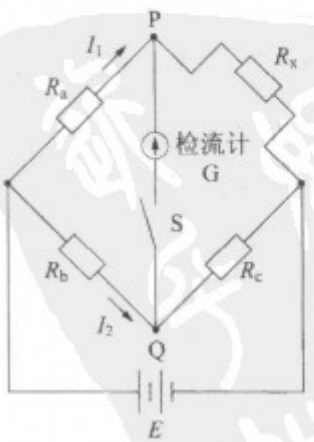


图 5.38　惠斯通电桥原理

如图 5.38 所示，在电桥的一个臂上接入被测电阻 R_x，合上开关 S，调节 R_a、R_b、R_c 使检流计指示为 0，则 P 点与 Q 点电位相等，于是式(5.3)～式(5.6)成立：

$$I_1 R_x = I_2 R_c \tag{5.3}$$

$$I_1 R_a = I_2 R_b \tag{5.4}$$

$$R_x R_b = R_a R_c \tag{5.5}$$

所以

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_c \tag{5.6}$$

这样即可以求出未知电阻 R_x。

电桥平衡

平衡法(零位法)

插值法

此时的状态称为**电桥平衡**，这种测量方法称为**平衡法(零位法)**。使用图 5.37 所示电桥时，可以选择“倍率”旋钮使 R_a/R_b 为 0.001，0.01，0.1，10，…，调节 R_c 可使电桥平衡，这样便可以很容易求得 R_x。如果调节 R_c 而不能使检流计指“0”时，则可用**插值法**计算求得。

例如，R_c 为 278Ω 时检流计 G 的值偏左 5 格，279Ω 时向右偏 3 格，由于总计偏移 8 格，故 R_x 为

$$R_x = 278 + 1 \times \frac{5}{8} = 278.63(\Omega)$$

交流电桥

图 5.39 所示为交流电桥的基本电路。交流电桥常用万用电桥。它是由交流电源、4 个阻抗臂及零点检测器(耳机或示波器)组成。平衡条件和惠斯通电桥相同，测量值可用下面的公式求得

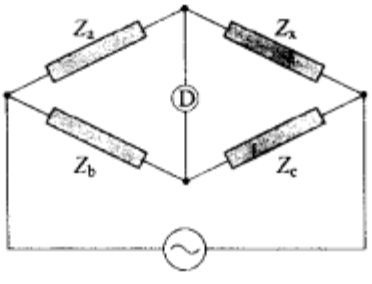


图 5.39 交流电桥

$$Z_x Z_b = Z_a Z_c$$

所以

$$Z_x = \frac{Z_a}{Z_b} \cdot Z_c \tag{5.7}$$

用该方法可如下测量电容器的电容。电路如图 5.40 所示，从电桥平衡条件可以得到

$$C_x = C_s \frac{R_b}{R_a} \tag{5.8}$$

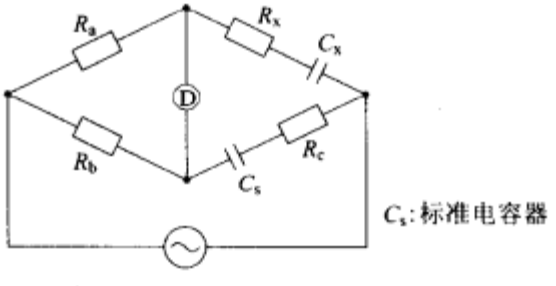


图 5.40 电容的测量

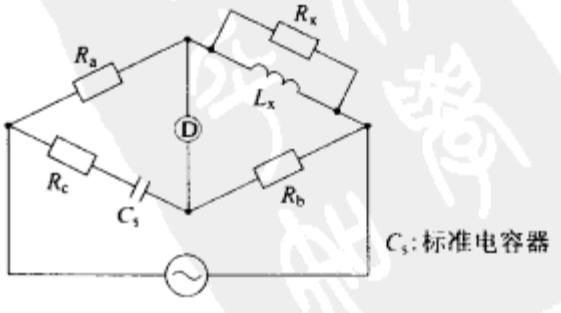


图 5.41 电感的测量

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} \cdot R_c \tag{5.9}$$

测量电感(线圈)如图 5.41 所示。从电桥平衡条件可以得到

$$L_x = C_s \cdot R_a \cdot R_b \tag{5.10}$$

$$R_x = \frac{R_a}{R_c} \cdot R_b \tag{5.11}$$

例 题

用图 5.37 和图 5.38 所示的惠斯通电桥测量电阻时，倍率旋钮的值为 0.1，当 $R_c = 5869\Omega$ 时电桥平衡。求被测电阻 R_x 为多少？

解说　从式(5.6)可得到

$$R_x = 0.1 \times 5869 = 586.9(\Omega)$$

答　586.9Ω

12　高频功率的测量

要　点

高频(特别是微波段)功率的测量方法有辐射测热功率表法和使用功率传感器的功率表法两种。

解　释

高频的影响

杂散电容

频率高到微波段时,由于普通导线所具有的电感以及导线与大地之间的电容(**杂散电容**)等因素,引起了低频情况下不曾想到的现象,带来了电路中看不到的影响(见图5.42)。

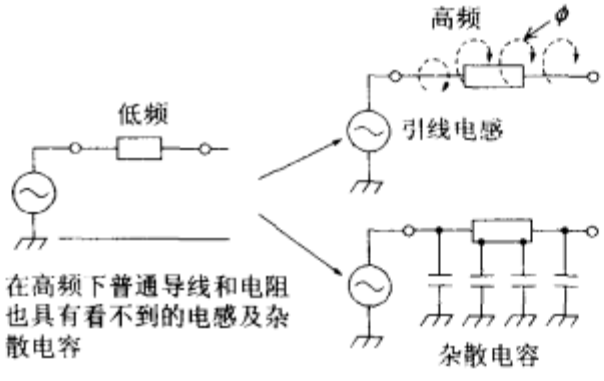


图 5.42　高频的影响

功率的测量也是一样,在低频下可以用电压、阻抗和功率因数来计算功率,但高频下由于看不见的电感和杂散电容的影响,阻抗大小无法确定。因而,出现了将高频能量转换成热能进行测量的方法。

辐射测热功率表

辐射测热

辐射测热元件是当它吸收了高频电能后温度上升,其电阻值发生变化的元件。常用的有热敏电阻和热线检测器。

图5.43所示的电桥能测量高频功率。设 $R_1=R_2$,则 R_3 与辐射测热元件的电阻相等时,电桥达到平衡。此时由于 $I_1=I_2$,即为电流表示值的一半。所以,首先给电桥加直流电压,调节 R_V 使电桥平衡,设此时的电流为 I_a,则辐射测热元件消耗的功率即为 $(I_a/2)^2R_H$。然后使被测高频电流流

过辐射测热元件，用同样的方法使电桥平衡。设此时电流为 I_b，则辐射测热元件消耗的功率即为 $(I_b/2)^2 R_H$。它与直流时消耗的功率之差即为高频功率。高频功率 P(W)可用式(5.12)求得，即

$$P=\frac{R_0{}^{1)}}{4}\times(I_a{}^2-I_b{}^2) \tag{5.12}$$

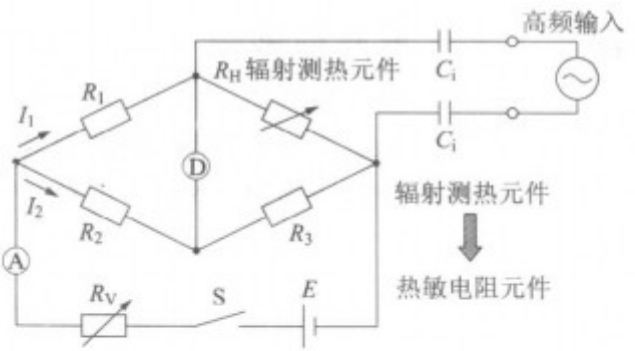


图 5.43　辐射测热法测量功率

使用功率传感器的高频功率表

图 5.44 所示为使用功率传感器的功率表的外观，图 5.45所示为它的电路构成。

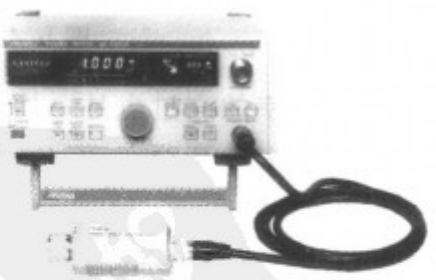


图 5.44　功率表与功率传感器

功率传感器

辐射测热法是利用吸收高频电能使温度升高，从而使电阻值发生变化来测量功率的。与之相应，**功率传感器**则是让电阻吸收高频电能而用热电偶检测其温度的上升。这种热电偶采用非晶体半导体薄膜。这种功率表可说是一种热电转换式功率表。

1) $R_0=R_3$——译者注。

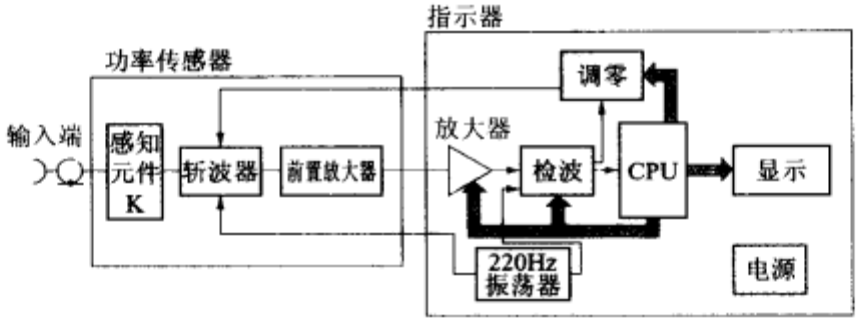


图 5.45　功率表的电路构成

13　电场强度的测量

要　点

电场强度是表示接收地点电波强弱的参数。在微波波段常用功率密度来表示。本章以电平表为例说明电场强度的测量。

解　释

电场强度

电场强度

电场强度是表示接收地点电波强弱的参数，单位为μV/m，它表示每米直线导体上产生的感应电动势。通常取1μV/m=0dBμ。电场强度可以采用在待测地点放一个已知有效长度的天线，并用专用的测量接收机来测量天线上所产生的感应电压来求得，如图5.46所示。

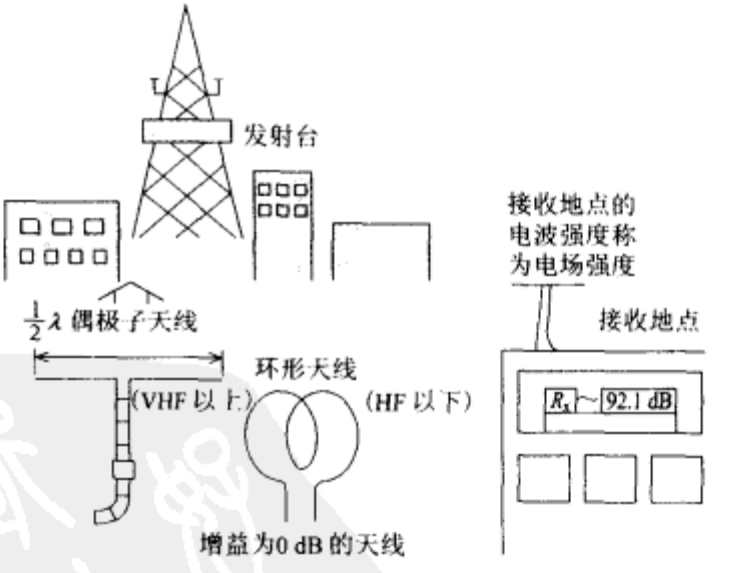


图5.46　电场强度与测量用的天线

电平表

电场强度测量仪
电视天线
共用电视系统
信号电平表

电场强度测量仪有多种，这里来看一看常用于调整**电视天线**和**共用电视系统**的**信号电平表**。图5.47所示为电场强度测量仪的外观，它是由电信号接收机和电子电压表组合成的仪器。

由于该仪器中对信号进行了A-D转换和数字处理，并

采用了频率合成器，所以频率设定准确，接收范围宽。另外，这种电平表具有显示频谱的功能。表 5.7 所示为该产品的主要性能指标。

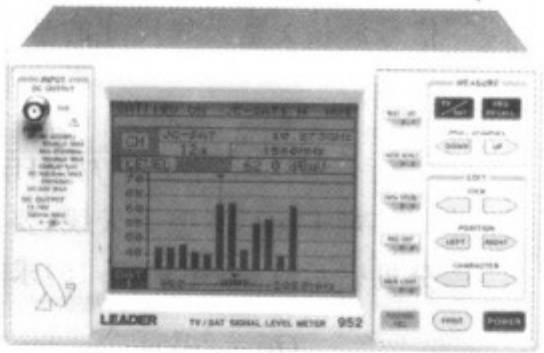


图 5.47 电场强度测量仪的外观

表 5.7 电场强度仪主要性能指标

项 目	范 围
接收频率	VHF/UHF/CATV：46～870MHz
	卫星：950～2050MHz
设定频率	VHF/UHF/CATV：50kHz 间距
	卫星：1MHz 间距
设定频道	日本，日本有线电视，美国等
电平测量范围	VHF/UHF/CATV：
	20～120dBμV(1μV=0dBμV，75Ω 终端值显示)
	−40～60dBmV(1mV=0dBmV，75Ω 终端值显示)
	卫星：
	45～100dBμV(1μV=0dBμV，75Ω 终端值显示)
分辨率	0.1dB
不确定度	±3dB

电场强度的测量

用电场强度测量仪测量电场强度时，首先按图 5.48 进行连接，并设定测量频率和频道。所使用的天线增益应是已知的，或者选用增益为 0dB/m 的 λ/2 偶极子天线。电场强度 G_0(dB/m)可以从实测的测量电平 G_r(dB/m)利用式(5.13)求得，即

$$G_o = G_r - G_H - G_A \tag{5.13}$$

式中　G_r——测得的电平，dB/m；

G_H——天线的有效高度，dB/m；

G_A——天线增益，dB/m。

信号波长 λ 是天线尺寸的基准，所以要预先求出，其计算公式为

$$\lambda = \frac{3\times10^8}{f} = \frac{300}{f(\mathrm{MHz})} \tag{5.14}$$

对于 $\lambda/2$ 偶极子天线，要把天线的有效高度 G_H 换算为分贝表示时，可用式(5.15)求得，即

$$G_H = 20\log\frac{\lambda}{\pi} \tag{5.15}$$

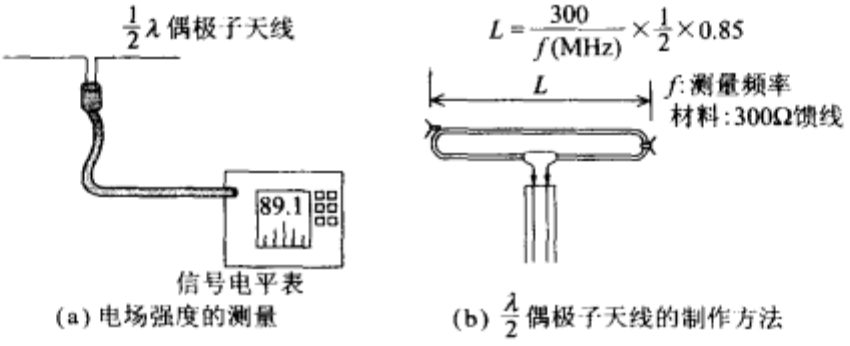


图 5.48　电场强度的测量及 $\lambda/2$ 偶极子天线

相关知识

◆ 测量设备与计算机

图 5.47 所示的电场强度测量仪不仅可以测量电场强度，同时还具备许多别的功能，如频谱分析仪的功能和数字显示功能。另外，还可装上 GP-IB 或 RS232C 等接口与外部进行数据交换。由于测量仪上带有单板机，所以它不但能与计算机连接进行自动测量，并且能同时测量若干个不同的参数。

例　题

图 5.48 中，1 频道(91.25MHz)的测量电平为 89.7dBμV。求用 $\lambda/2$ 偶极子天线测量时的电场强度为多少？

思路 根据式(5.14)求波长，然后将天线的有效高度换算成用分贝表示，就可以求得电场强度。

解说 $\lambda=\dfrac{300}{91.25}\approx 3.29\text{m}$，$G_H=20\log\dfrac{3.29}{\pi}\approx 0.396$

由于 $\lambda/2$ 天线的增益为 0dB/m，故电场强度为

$$G_o=G_r-G_H-G_A=89.7-0.396-0\approx 89.3$$

答 电场强度为 89.3dB/m

14　噪　声

要　点

噪声是指所需信号之外的一切无用信号。在放大电路和通信线路中，由于各种原因使输入信号产生幅度失真和相位失真，这些失真将作为噪声与信号一起输出。因而会造成不能正确测量或工作失常。

解　释

噪声

辐射噪声

传导噪声

噪声的种类及其产生原因

噪声(noise)可分为对外产生干扰和受外部干扰两种。其传播路径均是两个，即经空间(设备和输入、输出电缆)传播的**辐射噪声**和经电源电缆传播的**传导噪声**(见图5.49)。

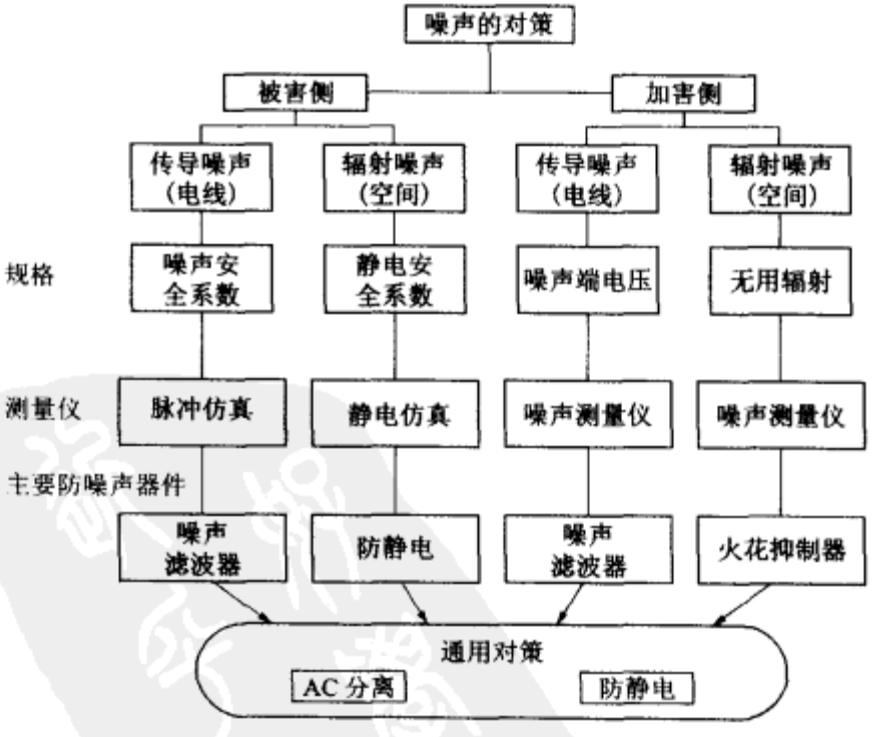


图5.49　噪声的对策

噪声到处都可产生。汽车驶过时，收音机里会听到火花塞放电脉冲干扰造成的“沙沙”声，离计算机太近的电视机屏上会出现干扰条纹。交流电是通过输电线传送给用户的，其间经过许多噪声源，混进噪声的可能性很大。

信噪比的测量

信噪(S/N)比
信号电压 S
噪声电压 N
分贝(dB)

信噪(*S*/*N*)比是**信号电压** ***S***(signal)与**噪声电压** ***N***(noise)之比,其单位用**分贝(dB)**表示。图 5.50 举例示出了音频放大器 *SN* 比的测量方法。

测量方法

① 将开关 A 扳到 S,来自振荡器的额定电压加到放大器的输入端,调节放大器的音量旋钮使输出到达额定值。此时电子电压表的读数为 *S*(dB)。

② 将开关 A 扳到 N,保持放大器的音量旋钮不动,读取电子电压表的读数。这时电子电压表的读数为 *N*(dB)。于是,*SN* 比可用式(5.16)求得,即

$$SN = S - N \tag{5.16}$$

音频放大器信噪比一般为 60～100dB。

噪声指数 *NF*

信号通过接收机等设备的电路后,*SN* 比会有所下降。信噪比下降的多少称为**噪声指数** ***NF***(noise figure),常用于表示接收机等设备对 *SN* 比的恶化程度。设接收机输入端的 *SN* 比为 SN_i(dB),输出端的 *SN* 比为 SN_o(dB),则噪声指数 *NF*(dB)可用式(5.17)求得,即

$$NF = SN_i - SN_o \tag{5.17}$$

接收机的 *NF* 一般约为 10dB。

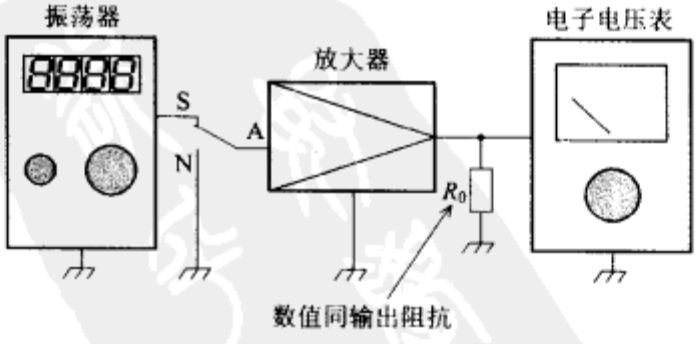


图 5.50 *SN* 比的测量电路

相关知识

◆ 如何防止噪声

为了避免噪声的影响,电子线路的设计和测量中必须遵循如下的基本原则

(见图5.51)。

① 信号线与电源线分开。交流电源带有很多噪声,不能将交流电源的引线与其他信号线扎在一起。

② 正确接地,防止静电干扰。集成块的 NC 端应接地,各个测量仪器的接地端应连接在一起。连线要尽量短。

③ 一点接地与屏蔽。在一个机箱中有数字电路、模拟电路、电源电路混合安装时,要将每块线路板分开布线,最后统一接地。这种方法称为一点接地法,对防止噪声是十分有效的。

此外,对于高输入阻抗或小信号放大电路等,最好根据需要采取屏蔽措施。

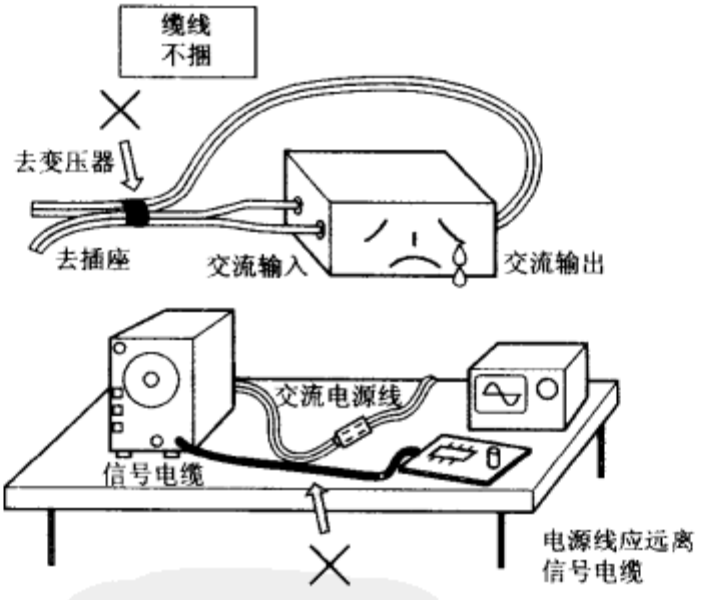


图 5.51　信号线与电源线分开防止噪声

15　传感器与生物体的检测

要　点

传感器是将各种信息变为电信号的元件。本节将介绍传感器的种类和使用方法。

解　释

传感器

传感器的种类和使用方法

传感器(sensor)是将温度、光等非电量转换成电学量的元件(见图 5.52)。传感器可起到与人的五官(眼、耳、鼻、舌、皮肤)相同的作用,但它不能像皮肤那样同时感知压力、温度等多种信息,只能由各个单一信息的传感器汇集起来。传感器只是机器的感觉器官,它必须和电压表或示波器等测量仪器结合起来才能完成对某个物理量的测量。表 5.8 列出了传感器的主要种类和检测对象。

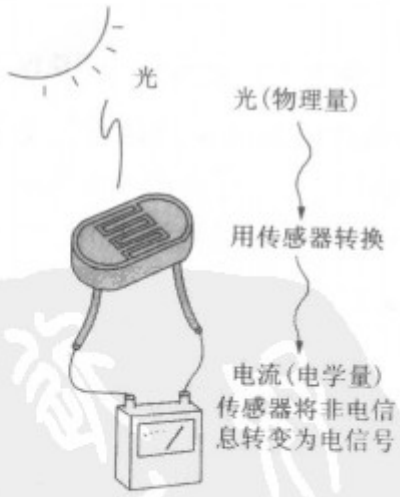


图 5.52　传感器是信息转换元件

表 5.8　传感器的种类及检测对象

项　目	传感器种类	代表性元件	主要检测对象
温度	热敏电阻	热敏电阻	温度
光、射线	可见光传感器 红外传感器	CCD、CdS 光电二极管	亮度、光强度 生物体,条形码
化学	气体传感器	n 型氧化物半导体	液化气,煤气、天然气

相关知识

◆ 利用热电型红外传感器检测生物体

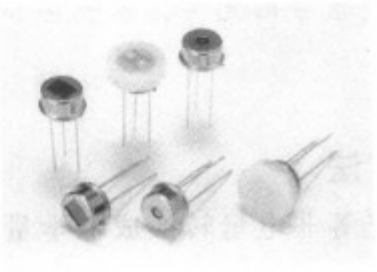


图 5.53　红外传感器的外观

热电型红外传感器及应用实例示于图 5.53 和图 5.54 中。当动物或人等生物体在热电型红外传感器的视野内移动时，红外线能量的分布就会发生变化，这种变化能被红外传感器检测到。由于检测到的信号太小，所以需经运算放大器加以放大，再用脉冲触发比较器转换为脉冲信号，由定时电路形成 LED 和继电器电路的输出。

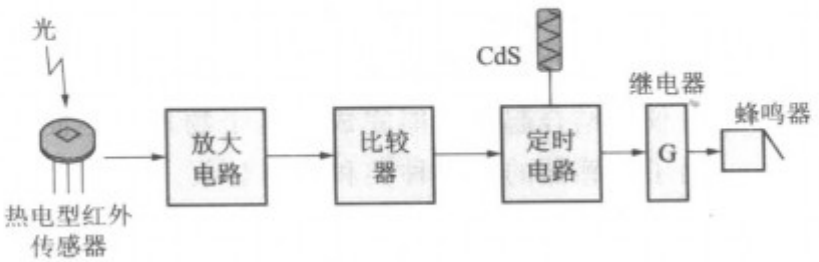
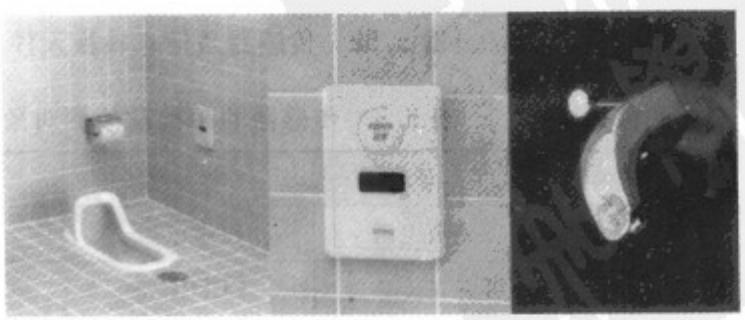


图 5.54　由热电型红外传感器构成的报警器

◆ 利用红外传感器的卫生间自动清洗系统

图 5.55 是利用红外传感器的卫生间自动清洗系统。红外线发光二极管发射的红外线从检测窗(发射和检测共用一个窗口)射出。在图 5.55(a)的大便器清洗系统中，光电二极管检测从人身上反射回来的红外线，由检测电路进行判断后，决定是否放水冲洗。图 5.55(b)所示的水龙头放水系统和图 5.55(c)所示的烤手机中，当人或手接近检测窗时，红外线被反射到光电二极管上，使它们开始工作。



(a)　(b)　(c)

图 5.55　卫生间自动清洗系统

16 光测量

要 点

利用光纤的电子设备和通信线路已相当普及。光纤的应用使传送媒质从金属变为玻璃，同时也给测量设备带来巨大变革。本章将学习光的知识和光测量仪器。

解 释

光与光缆

光

下面先来了解一下**光**的知识。从频率的不同来看交流信号，人们说话时耳朵能听到的声音是低频信号，无线电广播和电视广播的载波是高频、超高频(VHF)、甚高频(UHF)信号；频率继续升高，就到了红外线、可见光、紫外线等光频区。随着频率的升高，周期和波长逐渐变短，可以把交流信号和光理解成同一类物质(见图5.56)。

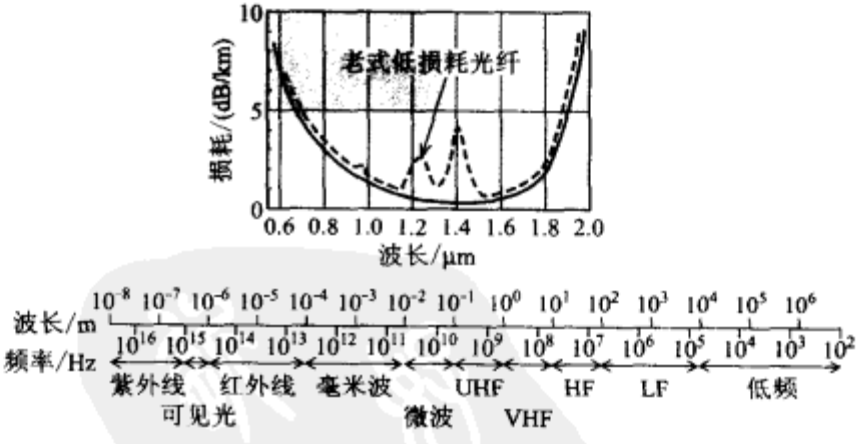


图 5.56 波长特性与频率

光缆

光缆是用玻璃纤维制造的，与金属导线相比，它具有损耗小、频带宽、无电磁感应、无串话、高绝缘、直径小及质量轻等优点，在国际电话等传输线路中已经实用化。光通信所使用的波长(频率)取决于光缆的**损耗特性**。从图 5.56 所示的特性可以知道，可以利用的波长从 0.76～1.3μm 以上(近红外到红外)。与老式光缆相比，OH 基光缆的损耗已改善为图 5.56 中实线所示的特性。通信波长也从较短的区域移向较长的区域，应用传输损耗更小的 1.55μm 波段了。

损耗特性

用于光通信的测量仪器

稳定化光源

光通信中所用的最基本的测量仪器是**稳定化光源**和光功率表。图 5.57 所示为稳定化光源的外观，图 5.58 所示是光功率表的外观。



图 5.57　稳定化光源与光传感器



图 5.58　光功率表和光功率传感器

LD
LED

稳定化光源是用作测量单波长损耗的光源，用于测量光纤和与光有关的元件的单位损耗。常用的发光元件有 **LD**（激光二极管或半导体激光器）和 **LED**（发光二极管）两种类型。LD 的输出功率大，常用于大损耗器件的测量；LED 的输出稳定，常用作精密测量的光源。

光功率表

光功率表用于测量光通信和激光的功率。它由光功率传感器和指示器组成。光功率传感器对来自 LD 和 LED 的空间传播光或光纤的输出光进行光/电转换（O/E 转换），指示器把转换成的电信号显示为光功率。

17　频谱分析仪

要　点

频谱分析仪是分析接收信号频率成分的测量仪器。该仪器的最大特点是当取横轴为频率、纵轴为电平时，它能直接得到信号的频谱。

解　释

频谱分析仪

高频畸变

图 5.59 是把用示波器和用频谱分析仪观察一具有**高频畸变**成分的信号时得到的波形画在同一张图上的模式图。被观测信号是一个具有二次谐波的失真正弦波信号。用示波器观察具有谐波失真的信号时，从波形畸变只能知道它不是正弦波而含有高次谐波成分，但究竟是多少次谐波？其大小为多少？都不能定量测知。相反，频谱分析仪则能利用其滤波器将信号分离成各个不同频率的正弦波，并定量地表示成频谱图，这就是**频谱分析**。由图 5.59 可知，信号是由基波和二次谐波合成的，各成分的振幅大小也可从频谱图上直接读出。

频谱分析

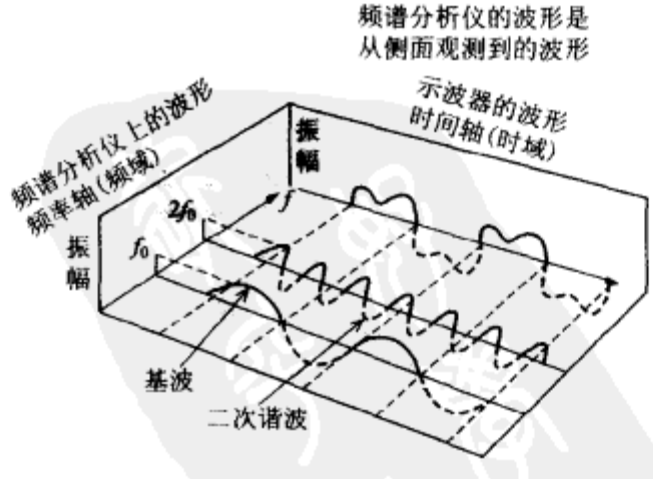


图 5.59　频谱分析仪和示波器观测到的波形

非扫描式
扫描式

图 5.60 所示为频谱分析仪的外观，图 5.61 是它的电路构成。如图 5.62 所示，频谱分析仪有**非扫描式**和**扫描式**两种。非扫描式频谱分析仪采用多个窄带滤波器对输入信号进行分离，并能同时求出各滤波器的输出。扫描式频谱分析

仪只有一个滤波器，但其中心频率随时间而改变，相当于多个滤波器。图5.61所示的电路是扫描式**超外差型**频谱分析仪的电路构成。

超外差型

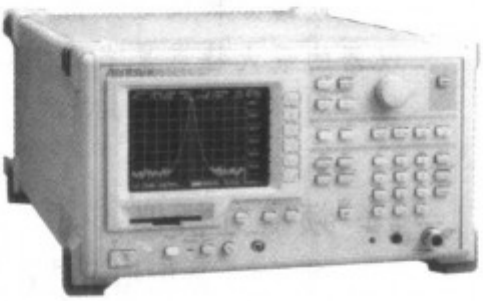


图5.60　频谱分析仪的外观

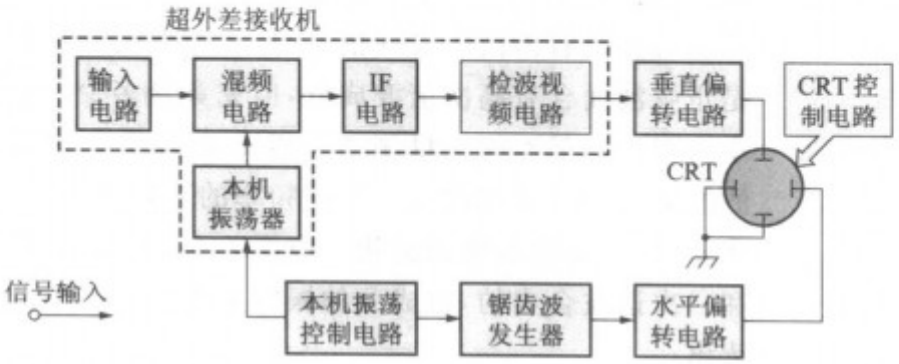


图5.61　超外差型频谱分析仪的电路构成



图5.62　频谱分析仪的原理

频谱分析仪可测量的频率范围为100Hz～8.5GHz的信号，其他指标列于表5.9中。

表5.9　频谱分析仪的主要指标

项　目		范　围
频率范围		100Hz～8.5GHz
间隔设定范围		0Hz，100Hz～8.5GHz
分辨带宽	设定范围	10Hz～3MHz(3dB)
	不确定度	±20%

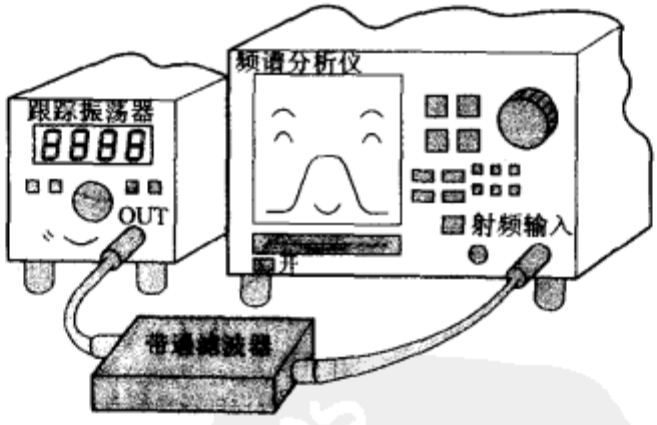
续表 5.9

项　目		范　围
分辨带宽	选择性(60/3dB)	≤15：1(100kHz～3MHz) ≤12：1(10Hz～30kHz)
电平测量	设定范围	平均噪声电平～+30dBm
	最大输入	连续波平均功率：+30dBm 直流电压：0V

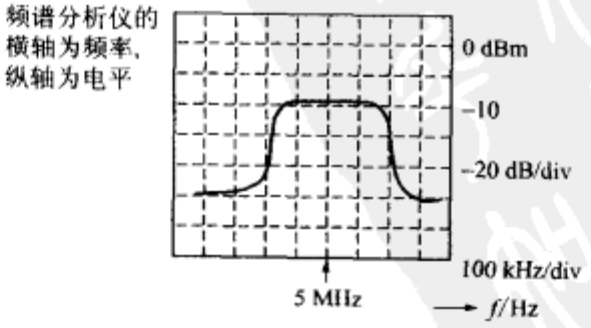
相关知识

◆ 用频谱分析仪测量滤波器的频率特性

可用下述方法测量滤波器的频率特性：将振荡器的信号输入到滤波器，再将滤波器输出端与频谱分析仪连接。如果频率范围很宽，显示画面宜用对数坐标，也可在线性频率轴上观测。图 5.63(a)、(b)所示是测量电路和观测实例。



(a) 滤波器频率特性测量电路



(b) 滤波器的频率特性

图 5.63　频谱分析仪

18　FFT分析仪

要　点

FFT分析仪是对输入信号进行快速傅里叶变换来分析频率成分(正弦波)的仪器。它具有频谱分析仪的功能,但频谱分析仪能分析很宽频谱的信号,而FFT分析仪只用于分析频谱在100kHz以内的信号。

解　释

傅里叶变换

□ 傅里叶变换与快速傅里叶变换

傅里叶变换是法国数学家傅里叶发现的理论,该理论认为:不管什么样的信号波形,只要它是周期性的,就都可以分解为不同频率的正弦波和余弦波(见图5.64)。

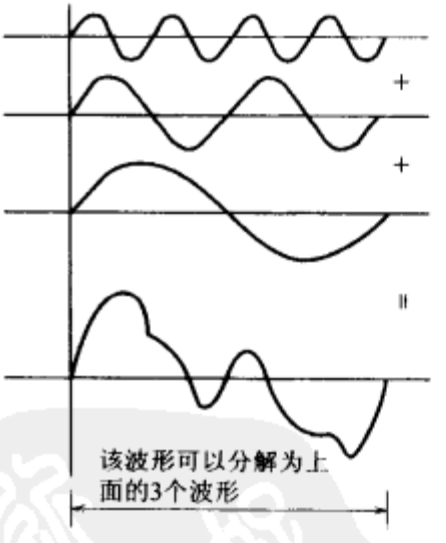


图5.64　傅里叶变换

例如,一个正弦交流电压$V(t)$(V)的数学表达式为

$$V(t)=V\sin(\omega t+\theta) \tag{5.18}$$

以交流电压为例,傅里叶证明了任何电压波形都是形如式(5.18)所示的正弦交流电压的集合。也就是说,设复杂的信号为$V_a(t)$(V),则它可如式(5.19)那样用正弦交流电压的集合表示,即

$$V_a(t)=V_1\sin(\omega t+\theta)+V_2\sin(2\omega t+\theta)+\cdots$$

$$=\sum_{n=1}^{\infty}V_n\sin(n\omega t+\theta) \tag{5.19}$$

式(5.19)称为傅里叶级数。

FFT
快速傅里叶变换算法

FFT(Fast Fourier Transform),即**快速傅里叶变换**,在以离散(数字)方式处理信号波形时,通过使用此 FFT **算法**,可大幅提高傅里叶变换的运算速度。

FFT 分析仪

FFT 分析仪

FFT 分析仪的外观和电路结构分别示于图 5.65 和图 5.66 中。FFT分析仪利用 A-D 转换器把输入信号变成数字量,然后再进行 FFT 运算处理,并将结果显示在 CRT 显示屏上。

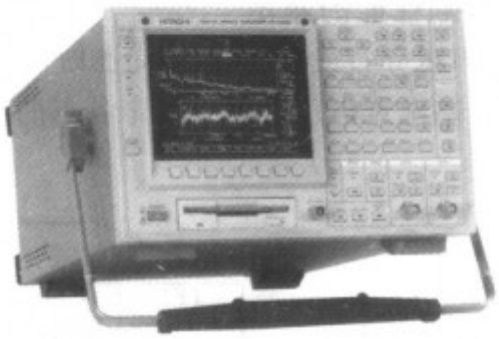


图 5.65 FFT 分析仪的外观

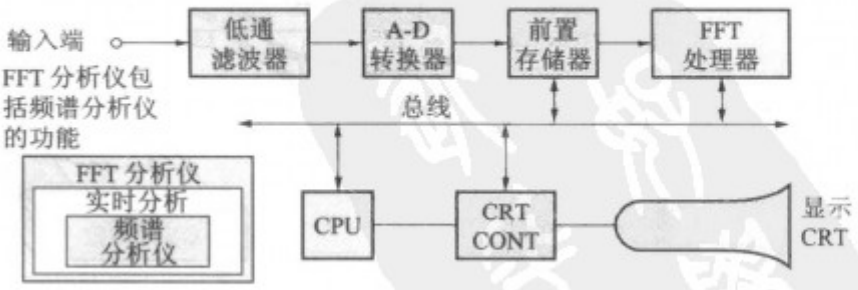


图 5.66 FFT 分析仪

FFT 分析仪具有以下特点:

① 运算速度快,能实时显示处理结果。

② 精度和频率分辨率高。

③ 由于能获得信号的振幅、相位、频率三要素,所以它可以进行傅里叶逆变换,再现输入信号。

④ 能测量传递函数、求取均值和相关函数。

FFT分析仪是与振动分析及音响分析一起发展起来的，从而也与音响传感器和振动传感器一起获得了大量应用。其应用实例如下：

① 振动与结构分析。

② 音响、噪声和语音的分析。

③ 数字、立体声的语音质量评价。

④ 设备噪声的评价。

⑤ 电话终端设备的评价。

相关知识

◆ 室内音响性能的测定

测量室内声压分布或门的隔音特性时，可如图5.67所示，首先选好基准点，以测量点与基准点声压之差来测定各点的声压。测量声压用的传感器采用噪声测量仪。

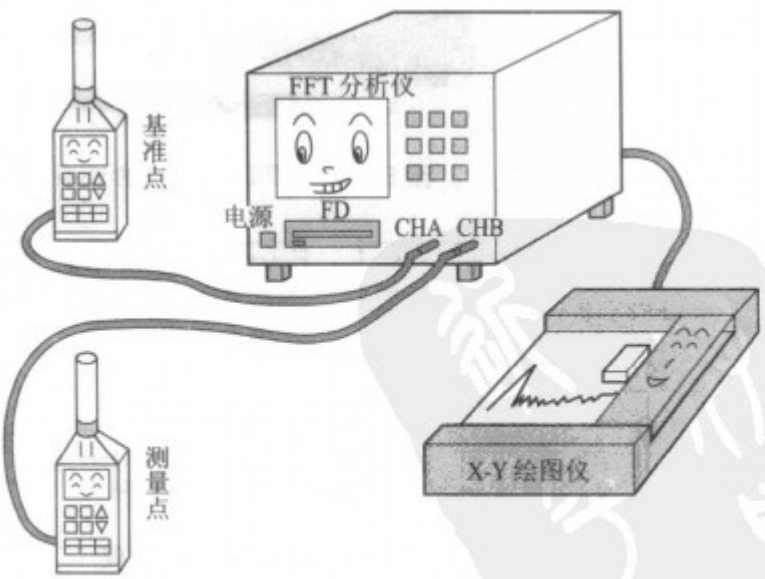


图5.67　室内音响特性的测定

FFT分析仪对测得的信号进行倍频程分析后，将数据传送给X-Y绘图机记录下来。

19 各种应用测量

要 点

应用测量是指测量电学量以外的物理量及化学量。最近，由于计算机硬件技术的发展，能同时测量多种参数的综合测量设备也进入到应用测量中。数字移动无线发射机测试器和网络分析仪都是其中之一。本节就以这两种仪器为例子以说明。

解 释

数字移动无线发射机测试仪

数字移动无线发射机测试仪

图 5.68 所示是**数字移动无线发射机测试仪**的外观。在船用通信设备和小功率无线收、发信机向着小型化和数字化迅速发展的进程中，出现了一种数字移动无线发射机测试仪。它是一种只用 1 台仪器就可以评价移动通信发射机各主要特性的测量仪器。



图 5.68 数字移动无线发射机测试仪的外观

该测试仪内部装有频谱分析仪、功率表和标准振荡器等，其频率覆盖范围为 100Hz～8.5GHz，除了能评价发射机的射频信号（射频最大输出 10W）外，还能快速测量频率、占有带宽、天线功率、调制精度（相邻频道的泄漏功率、寄生调制）等。

下面简单介绍一下数字调制的知识。图 5.69 是 π/4 QPSK 信号的状态图。π/4QPSK 是 PSK（Phase Shift Keying，相位调制方式）的应用，它是用 4 个调制数据对相对变化了 ±45° 和 ±135° 的载波进行调制的一种调制方式。用



图 5.69　π/4QPSK 信号状态图

数字移动无线发射机测试仪能观测到这种调制方式的状态，其状态图如图 5.69 所示。

网络分析仪

网络分析仪

图 5.70 所示是**网络分析仪**的外观，表 5.10 列出了仪器的主要指标。

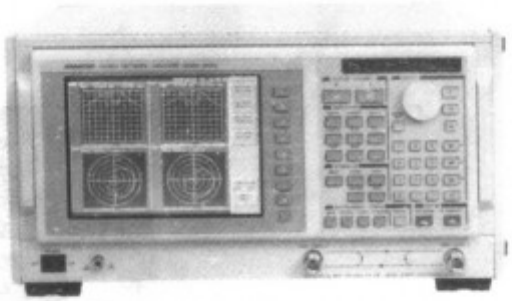


图 5.70　网络分析仪的外观

表 5.10　网络分析仪的主要指标

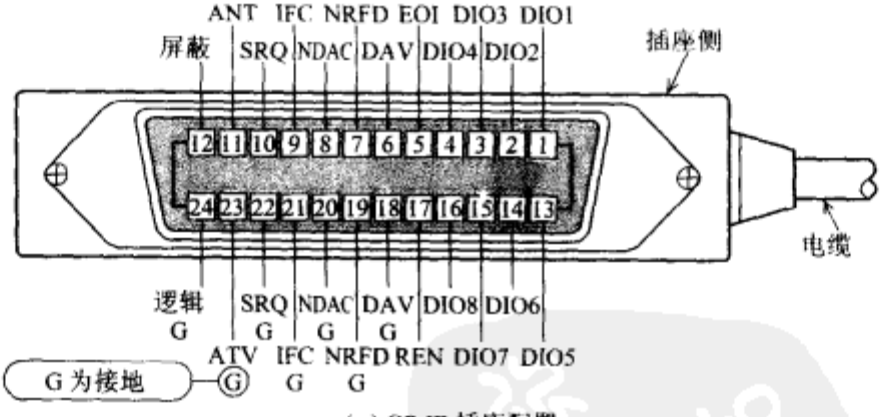
项　目	范　围
测量频率 分辨率	40MHz～8.0GHz 100Hz
输出电平 分辨率	+10～−15dBm 0.01dB
输入频道	2
输出频道	1
分辨率带宽	10kHz～10Hz(1，3 挡)
动态量程	90dB/3kHz RBW，100dB/10Hz RBW
动态量程精度 分辨率	0.05dB 0.01dB

网络分析仪主要是测量两个信号之间的振幅和相位特性的仪器，用该仪器测得的模拟电路线性工作区传输特性和阻抗特性，几乎能完全地描述模拟电路的特性。所以，无论是电容器、电阻等元器件，还是传输线路中的电路、设备和系统，都能用网络分析仪进行分析。

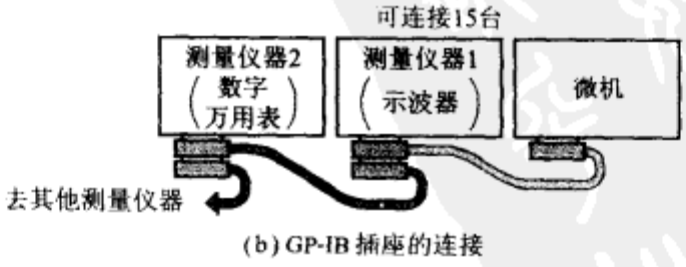
相关知识

◆ 用于测试仪器的 GP-IB 接口

除了模拟仪表之外，为了将数据传给计算机，现在的测量设备几乎都带有接口插座，GP-IB 接口就是其中之一。GP-IB 插座与电缆的连接如图 5.71 所示。GP-IB(General Purpose Interface Bus)接口是美国 IEEE(美国电气电子工程师协会)于 1975 年提出的标准化接口，因而也称为 IEEE-488 或 IEEE-IB。它与 RS232C 等其他接口最大的不同是联机数可以多达 15 台，且传输速度比 RS232C 快。



(a) GP-IB 插座配置



(b) GP-IB 插座的连接

图 5.71 GP-IB 插座与电缆的连接

◆ 从观测波形读取电压最大值和周期

图 5.72 所示是示波器观测到的波形。若垂直灵敏度为 10mV/div，即每厘

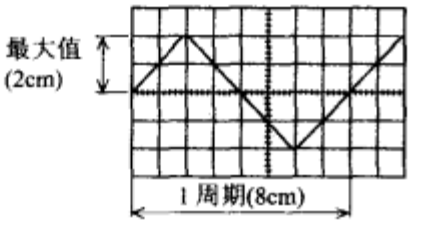


图 5.72　示波器上的观测波形

米为10mV，图中波形的最大值为2cm，所以最大值为

$$V_m = 10\text{mV/cm} \times 2\text{cm} = 20\text{mV}$$

设扫描时间为1μs/div，即扫描时间为每cm代表1μs，图中波形的周期为8cm，所以周期为

$$T = 1\mu\text{s/cm} \times 8\text{cm} = 8\mu\text{s}$$

20 计算机测量

要 点

电子测量中，使用PC机等计算机这种省力的自动测量已经成为主流。即使手头没有专用的示波器及FFT分析仪，而只要有测量用的PC机和软件，以及带PC卡或插板或直接从USB口连接到传感器的测量用测头等，即可轻松地完成测量。对于必须要按时间历程来进行测量的实验等，这种测量既省事又方便。

解 释

PC机测量

使用PC机的测量，是测量自动化系统的一种。它是将计算机与各种测量仪器用网络连接在一起，在计算机的管理下自动进行测量的系统。

PC机测量具有以下的优点：

① 因为可自动化测量，所以易实现长时间的测量，可节省人力。

② 因为测量数据输入PC机，所以易进行高水平的数据分析等后处理。

③ 进行各种不同的测量，只需更换软件、接口板及传感器即可。

图5.73给出了使用PC机进行自动测量的例子。此时是接到LAN上，由主计算机进行测量管理。对测量仪器使用DMM，可瞬时测量并记录电流、电阻、频率等各种数据。

例如，测量一次电池的放电特性时，即是每隔一定时间可测量并记录电压值。上传到PC机进入图表计算软件程序后，由于有图表显示功能及专用软件亦有示波器那样的功能，所以可进行图表显示。

图5.74给出了专用软件的例子，此软件是专用于开发测量系统的。通过将各种功能模块组装入Excel和Visual Basic，系统即可广泛用于电压及电流等的测量，或作为笔式记录仪及FFT分析仪等来使用。

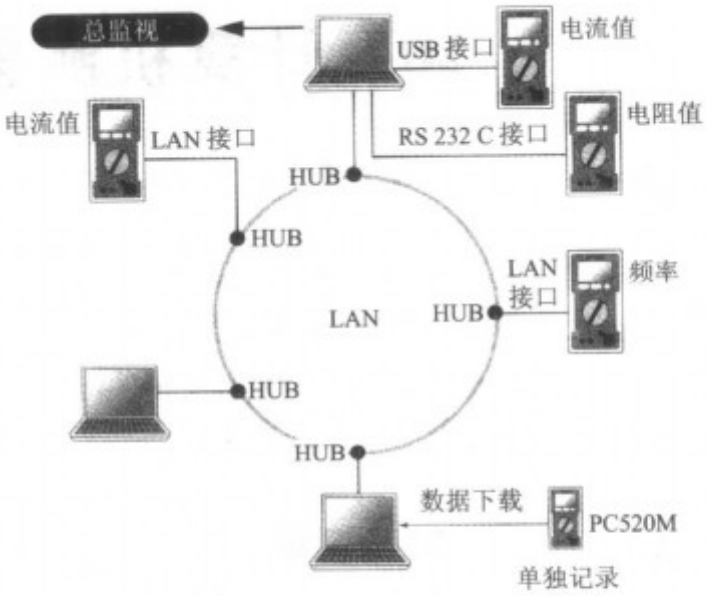


图 5.73　PC 机测量例

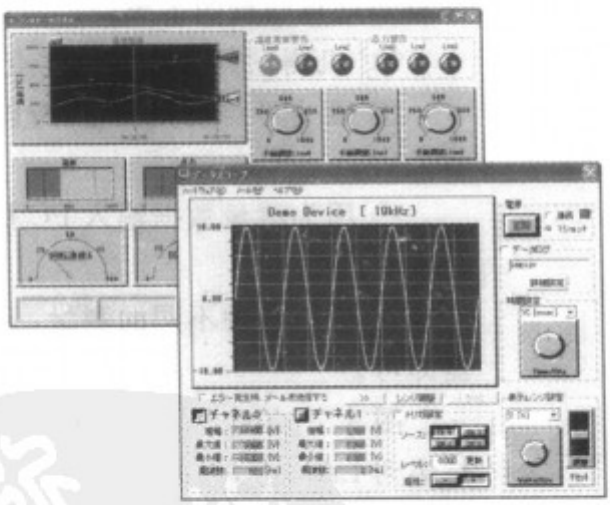


图 5.74　Active X(照片提供:(株)Contech)

数据记录器

所谓数据记录器是指自动测量并记录温度、电压及脉冲等的装置。图 5.75 和图 5.76 给出了数据记录器的外观。图 5.75 示出的是手持移动测量的便携式,它装有 40GB 的硬盘,并具有可当场图表显示测量数据及确认测量状况等优点。



图 5.75 便携式数据记录器



图 5.76 远程设置数据记录器

图 5.76 所示为既能用于远程设置，也能用于气象数据等观测的装置。测得的数据可通过手提电话打包传送。另外，也可以将数据记录保存到 CD-ROM 上，或用 PC 机对数据进行处理。

篇外话

测量仪器产生的有效值概念

交流电压 $e=E\sqrt{2}\sin\omega t$ 的有效值，定义为 $E=\sqrt{(e^2\text{ 的平均})}$，表示与等于此量的直流电压做功相同。而要提起有效值概念的产生，则要追溯到爱迪生与西屋的交、直流输电争论的 19 世纪 80 年代。当时是交流与直流混用的时代，因此也造成了交、直流两用的测量仪器的大量使用。交流有效值的概念，即是在用交、直流两用测量仪器测量交流的电压电流时，仪器给出的示值所产生的概念，而非数学公式所产生。

第 6 章

信息技术

● 责任编委
小市直人
● 执　　笔
小市直人(9～16)
藤牧秀信(1～8)

当今社会已进入高度信息化的时代，这个时代是由信息技术（IT:Information Technology）的发展造就和支撑着的。计算机技术成为产业中的核心技术，硬件开发和软件开发齐头并进；互联网（internet）成了重要的通信媒体，应用领域和技术开发稳步扩大。可以毫不夸张地说，如果没有了IT技术，社会各个产业的发展都会受到一定程度的影响。

在这样的高度信息化社会中，以人为本自主使用IT技术的问题显得尤为重要，为此就要牢固地掌握IT技术基本知识，并与技术保持更加良好的和谐关系。

本章在讲述计算机基础知识的同时，对于相关的新领域也进行了讲解。IT技术确实给人们带来了极大的方便；而另一方面，垃圾邮件、病毒、网络犯罪等令人烦恼的问题也随之而来。本章中也针对这些问题讲述了一些对策。

1　计算机的构成

要　点

计算机是由眼睛看得见的一些硬件和控制这些硬件的软件共同构成的。硬件由电子器件构成，按其功能可分为五种基本装置。

软件有管理硬件的软件和执行用户所要处理的内容的软件之分，即管理软件和应用软件。

解　释

输入装置

输出装置

主存储装置

控制装置

算术逻辑运算装置

中央处理装置

计算机的基本构成

如图6.1所示，计算机一般由下列五部分构成：① **输入装置**，它的作用是输入数据；② **输出装置**，它的作用是输出数据；③ **主存储装置**，它的作用是储存数据和程序；④ **控制装置**，它的作用是对整个计算机进行管理；⑤ **算术逻辑运算装置**，也常简称为运算装置，它的作用是进行计算和判断。这五种装置中，主存储装置、控制装置和算术逻辑运算装置合在一起总称为**中央处理装置**（CPU：Central Processing Unit）。

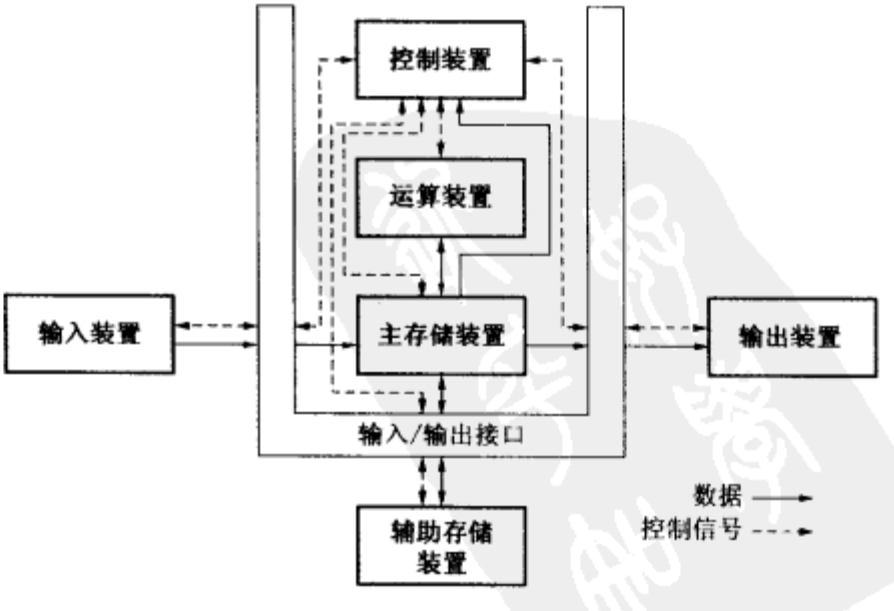


图6.1　计算机的基本构成

个人计算机的情况下，计算机主机起着中央处理器的作用，由名为 CPU 的 IC 和存储装置构成。CPU 是表征计算机性能的基本装置。

计算机的简单工作原理介绍如下：

从输入装置送来的数据和程序，一并存入主存储装置。接着，程序中的指令被送到控制装置，控制装置对其解码后产生出控制信号，并把这些控制信号送到其他各装置进行处理。

被送到运算装置的数据，经过运算装置处理后，其结果仍然存入主存储装置，然后再送给显示器、打印机等输出装置。这一连串的处理，全都是在控制装置所发出的控制信号的控制下进行的。

个人计算机的基本硬件设备如图 6.2 所示。其软件有用于管理硬件的操作系统(OS：Operating System)和用户在操作系统上运行的应用程序。



图 6.2　个人计算机的基本构成实例

相关知识

◆ 诺依曼式计算机

程序内置方式(stored program method，也称为逐次处理方式)是由在美国普林斯顿高级研究所工作的冯·诺依曼(1903～1957)所提出的，故称为诺依曼式。这种方式是首先把程序存入计算机的存储装置，然后让所存入的程序按照处理顺序自动运行的。现在的计算机全都采用这种方式。

2　控制装置和算术逻辑运算装置

要　点

控制装置由各种寄存器(register)、计数器(counter)和译码器(decoder)构成，它能够把储存在主存储装置中程序的指令依次取出，并经过译码(decode)后向各装置发出必要的信号，从而使计算机自动地进行连续处理。

算术逻辑运算装置是按照控制装置所发出的指令进行算术运算(四则运算)和逻辑运算(AND、OR及NOT等)的装置，它由补码器、累加器及各种寄存器构成，加法器(adder)是其核心部件。

解　释

控制装置

控制装置的功能概况如图6.3所示。

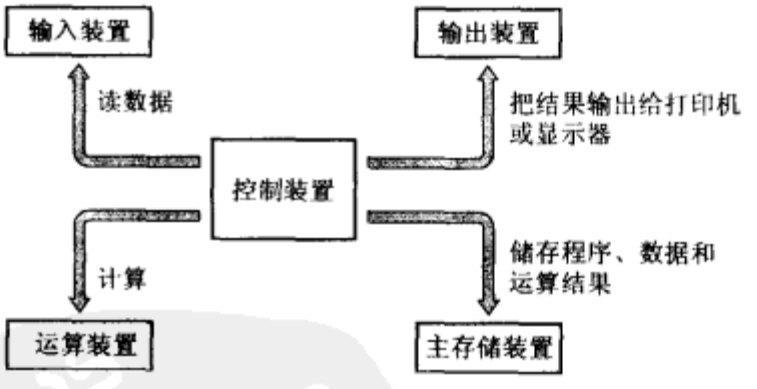


图6.3　控制装置的功能

能使计算机产生动作的是由二进制代码所构成的机器语言，因而，程序是被变换成机器语言指令存放到主存储装置中的。控制装置的作用就是把这些机器语言指令逐条取出来译成指令码，并形成控制信号去控制计算机系统进行工作。

控制装置由下述各寄存器和译码器构成。

指令寄存器

- **指令寄存器**(instruction register)　它用于暂时存放程序执行过程中从存储装置中所取出的指令。

指令地址寄存器

- **指令地址寄存器**(instructionaddressregistor)　也称

顺序控制计数器

为程序计数器或**顺序控制计数器**，它用于存放主存储装置中所储存的指令字的地址。一条指令执行后，它就变成下一条要执行指令的地址，如果是固定字长的情况则加 2，如果是可变字长的情况则加指令字的长度。

变址寄存器

• **变址寄存器**(index register) 也称为指数寄存器，它是在进行地址修改或计数时所要使用的寄存器。变址寄存器的内容与指令字地址部分的地址值相加后所得到的值将指出处理对象的执行地址。

指令译码器

• **指令译码器**(instruction decoder) 也称为解码器，它对取到指令寄存器中的指令字的指令部分进行解码，从而得出与各指令相对应的控制信号。

算术逻辑运算装置

算术逻辑运算装置由如下各部分组成。

补码器

• **补码器** 关于补码，在第 4 章已经介绍过了。计算机中的运算是以加法为中心进行的。例如，当计算 8－5 时，计算机是把这个减法变为 8＋(－5)的形式来求解的。求取(－5)这个值的部件就是**补码器**(complementer)。

各种寄存器

移位寄存器

标志寄存器

• **各种寄存器** 它用于存放运算当中所需的数据和运算结果，其主要寄存器有**移位寄存器**和标志寄存器等。移位寄存器的作用是在有移位信号输入时使指定位的内容左右移位，以此来提高乘除法运算的效率。**标志寄存器**是用来指示运算结果是正、是负还是零，以及有没有位溢出等。

累加器

• **累加器**(accumulator) 它是一种临时存放四则运算和逻辑运算等结果的寄存器。当累加器中已存有某一数值时，若又有别的数值输入，则累加器的内容将被这两个数之和所置换。

相关知识

◆ **地　址**

计算机的存储器按顺序编有地址号，当某个地址上存有某个单元信息时，该地址就是识别信息存放在什么地方的识别编号。

◆ 指令字的格式

启动运算装置和存储装置的指令是用机器语言来编写的，指令的格式由指令部分(operation part)和地址部分(operand part)构成(见图 6.4)。指令部分表示输入、输出和四则运算数据的传送等，地址部分表示成为指令对象的数据存放在存储装置的哪个地址下。

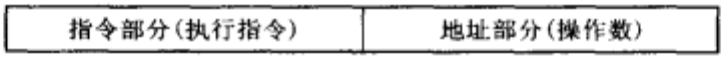


图 6.4　指令的格式

◆ 寻　址

寻址对于只处理高级语言的场合没有多大意义，但在机器语言(汇编等)中是非常重要的。用机器语言编写程序时，中央处理装置能够通过指定地址，从特定的存储器和输入、输出端口来读写数据，这就是寻址。图 6.5 示出了三种地址指定方式。

① 直接寻址(direct addressing)：地址部分的内容就是数据在存储装置中的存放地点。

② 间接寻址(indirect addressing)：地址部分的内容是数据存放单元的入口地点。

③ 立即寻址(immediate addressing)：地址部分的内容不是存放着数据的主存储装置的地址，而是存放着处理对象的数据值本身。

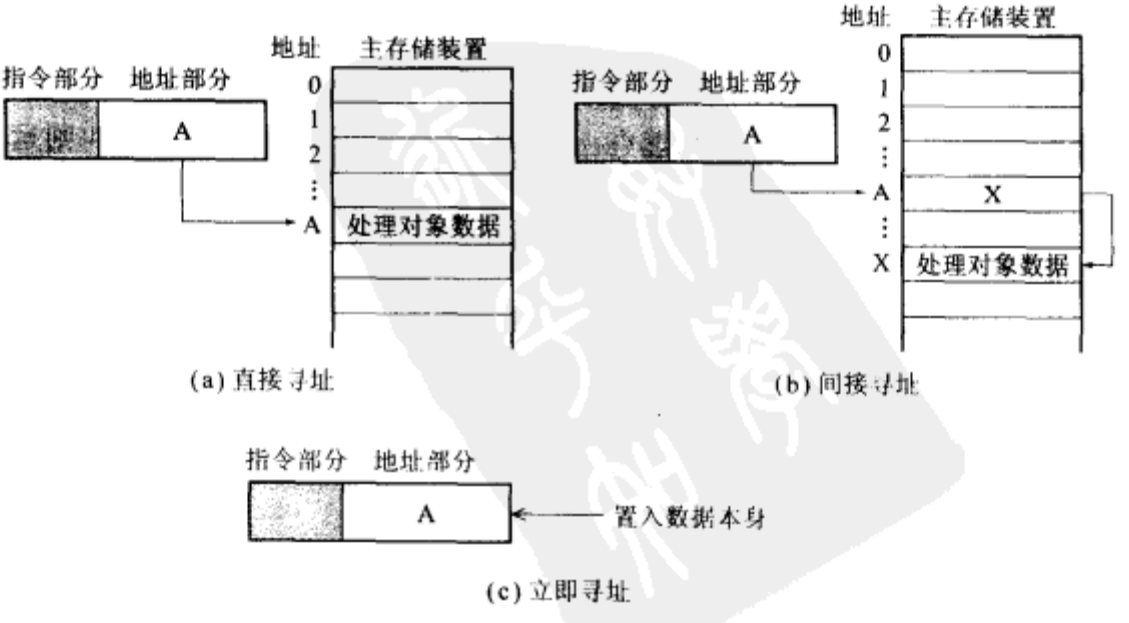


图 6.5　寻址方式

3 主存储装置

要 点

存储装置的能力取决于存储容量和读写速度。存储容量通常用字节(byte)数来表示;读写速度通常用存取时间和循环时间来表示。

主存储装置用于存放程序和数据,程序和数据是由控制装置来存取的。与辅助存储装置相比,主存储装置的存取时间快,但存储容量小。

解 释

主存储装置

如图 6.6 所示,主存储装置由主存储器、存储器地址缓冲寄存器和存储寄存器等构成。主存储器用于存放数据,存储器地址缓冲寄存器用于存放存储器的地址,存储寄存器用于输入、输出装置与微处理器等交换数据之间暂时存放数据。

存储器件有可以自由读写的 RAM(Random Access Memory)和专用于读出的 ROM(Read Only Memory)两大类。

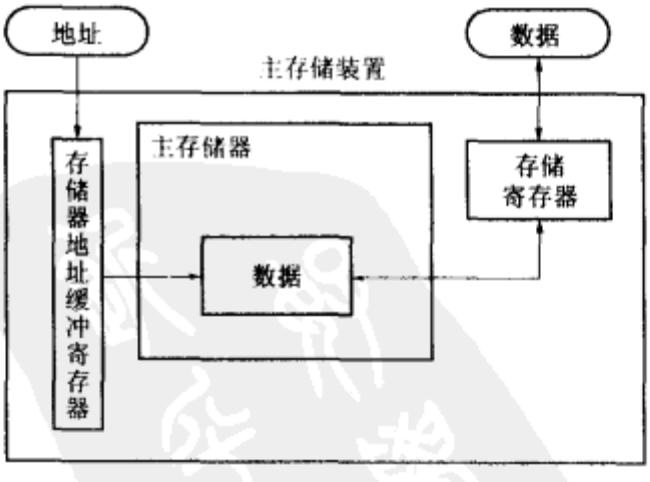


图 6.6 主存储装置

相关知识

◆ **主存储器(main memory)**

这个存储器上带有地址,数据的读写可以通过在程序中指定这个地址来实

现。存储器容量的大小随计算机的不同而异。图 6.7 所示为个人计算机所用的主存储器的实物照片。

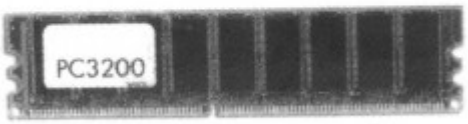


图 6.7　个人计算机用的主存储器

◆ **存储器地址缓冲寄存器(memory address register)**

存储器地址缓冲寄存器用于暂时存放微处理器所指定的主存储器数据的存放地址。

◆ **存储寄存器(memory register)**

存储寄存器用于输入、输出装置与微处理器之间进行数据交换时暂时存放数据。

◆ **循环时间(cycle time)**

循环时间是指主存储装置从进行数据读写到准备好接受下一个指令为止的时间。例如,8MHz 的微处理器的循环时间为 1/8MHz=125ns。

◆ **存取时间(access time)**

存取时间是指从指令发出到该数据实际得到为止的时间。这个时间越短,计算机的处理速度就越快。存取时间也称为指令调用时间。

◆ **PC2700/PC3200**

PC2700/PC3200 是个人计算机所用的主存储器 DDR SDRAM(Double Data Rate Synchronous Dgnamic Random Access Memory)的型号规格。

其数值表示每秒钟可读写的数据量(单位为 MB),它取决于个人计算机的基本时钟的快慢。PC2700 的基本时钟采用 133MHz,PC3200 的基本时钟采用 200MHz(见图 6.7)。

4　中央处理装置的基本工作原理

要　点

中央处理装置(CPU)是计算机的心脏，它由算术逻辑运算装置、控制装置和主存储装置构成。CPU在工作时先把储存在主存储装置中的指令送入指令寄存器，然后边解释边执行。通常说到CPU时，往往是指计算机主机，个人计算机的CPU也称为MPU(Micro Processor Unit，微控制器)。

解　释

□ 中央处理装置的基本工作原理

如图6.8所示，中央处理装置的工作就是不断地重复读入指令和执行指令两个步骤。

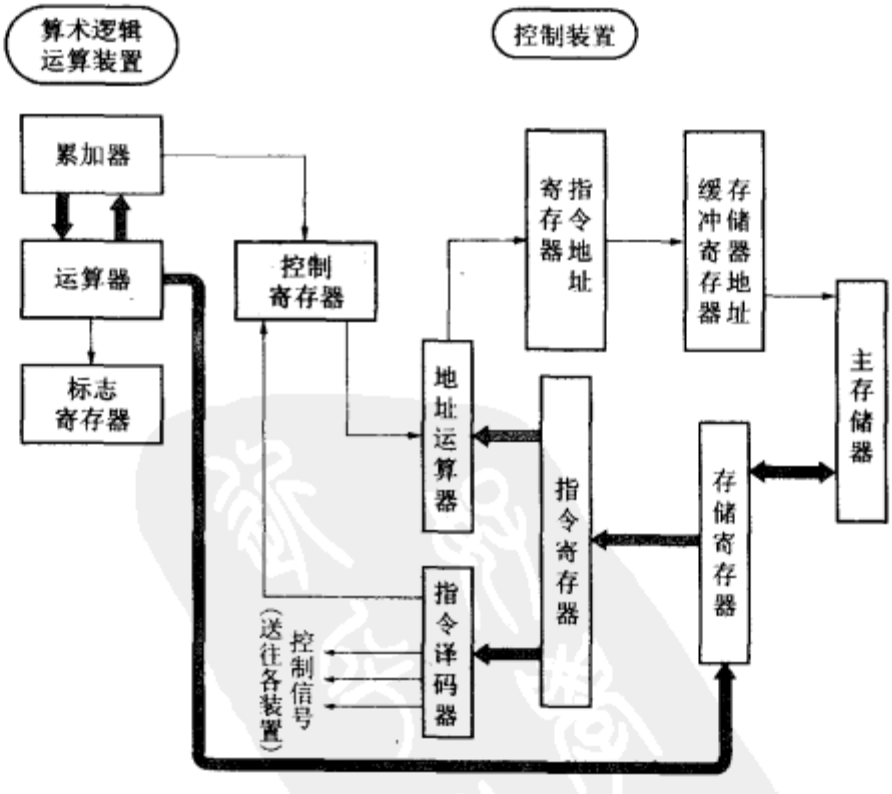


图6.8　CPU的基本处理过程

□ 指令读入阶段(instruction fetch cycle)

① 程序存在主存储器中。

② 按照控制装置所发出的命令把存放程序的地址存入指令地址寄存器(程序计数器)。

③ 主存储器的地址内容经由存储器寄存器转送到指令寄存器中。

④ 指令地址寄存器的内容移到下一个地址,等待控制寄存器的命令。

指令执行阶段(execution cycle)

① 已传送到指令寄存器中的内容,其指令部分被送到指令译码器,译码后产生出控制信号。

② 从指令寄存器的地址部分将运算对象的地址送到地址运算器。

③ 地址运算器所指定地址的内容(数据)被读进运算装置的累加器。

④ 存储器寄存器的数据与累加器的数据进行运算,其结果存入累加器,并将这一信息传送给控制装置的地址运算器。

⑤ 处理结束后返回到②。

关于操作系统的安装

为了使应用程序能够运行,需要先在主存储器中存入操作系统(OS)。这个OS需要启动个人计算机ROM中的**IPL**(Initial Program Loader),从BIOS所设定的辅助存储装置中读入。

IPL

相关知识

◆ 计算机按使用方式的分类

① 通用计算机(general purpose computer):它是以宽范围的业务应用为目的而制造的计算机,其机种有大型机、中型机、小型机等。

② 超级计算机(super computer):它是以超高速运算为目的而制造的计算机,主要用于大学和研究所等。

③ 办公室计算机(office computer):它是以小型企业等事务处理为目的而制造的计算机。

④ 个人计算机(personal computer):它的特点是小型廉价,故而已作为个人使用而普及。这种计算机在企业中也用得很多,有笔记本式、台式等多种机型。

⑤ 个人数据助理(PDA:Personal Digital Assistant):它是能够用触摸屏或小型键盘进行互联网阅览、电子邮件收发及图表管理等的袖珍型计算机。

5　输入输出装置

要　点

中央处理装置在进行数据处理时需要从外部读入数据和把处理结果送往外部。

读入数据的装置称为输入装置，把处理结果送往外部的装置称为输出装置。

典型的输入装置有键盘、鼠标等，典型的输出装置有显示器、打印机等。

解　释

□ 输入装置

键盘

• **键盘**(keyboard)　它是一种把文字键、数字键及符号键等按照一定规则排列在一起而构成的输入装置。

鼠标

• **鼠标**(mouse)　它是一种由转动球或光传感器与开关构成的输入装置，能够在显示器上的光标的指示下输入数据。由于它的样子与老鼠相似，因而称为鼠标。

触摸屏

• **触摸屏**(touch screen 或 touch panel)　它是一种利用操作屏上的透明压感元件来输入位置信息的输入装置，常用于 PDA 或金融机构的 ATM 机等。

条形码

• **条形码**(bar code)　印在商品上的那种粗细不同的平行线组就称为条形码。当这种条形码通过检测传感器时，平行线组就变换成了数字，商品的特定数据便输进了计算机。后来又出现了一种称为 QR 码的二维码，这种二维码比一维码的数据量大得多。二维码输入装置可以用来输入汉字。

图像扫描器

• **图像扫描器**(image scanner)　它是一种能够把图片和照片等图像的亮暗和颜色变换成数字化数据的输入装置。

光学式文字读取装置

• **光学式文字读取装置**(OCR：Optical Charactor Reader)　它是一种把光线照射到纸面上，利用反射光来识别纸上所写文字的装置。按规定，它能够识别符合 JIS 的字形。随着模式识别技术的不断进步，现在已能够识别手写文字了。

光学式标志读取装置

• **光学式标志读取装置**(OMR：Optical Mark Reader)　试验中心等场所常使用各种固定格式的报告单，当在报告单

上用铅笔画上记号时，这种装置能够通过把光照射到报告单上来读取所标的记号。

图形输入板

• **图形输入板**(tablet) 它是一种由图板和笔构成的坐标读取装置，采用笔压式图形软件，能够把手绘的图形输入到计算机中。

语音输入装置

• **语音输入装置**(audio input unit) 它是一种能把话筒所输出的语音信号变换成数据从而输入到计算机中的装置。

显示(输出)装置

CRT 显示器

• **CRT 显示器**(cathode-ray tube) 它是一种用阴极射线管所构成的显示装置，显示文字的称为字符显示器(charactor display)，显示图形的称为图形显示器(graphic display)。这种显示器的基本原理是通过控制阴极射线管的电子束强弱来改变显示屏上的光点亮度，从而得到文字和图形的，其图像分辨率取决于扫描线数的多少。

液晶显示器

• **液晶显示器**(LCD:Liquid Crystal Display) 液晶在其上面未加电压的状态下能使通过它的光偏振面旋转 90°，而当给它加上电压时，这种性质就会消失。液晶显示器就是利用这一特性来显示文字或图像的。这种显示器广泛用于个人计算机、手持式计算器及电子钟表等。

等离子体显示器

• **等离子体显示器**(plasmadisplay) 这种显示器利用的是密封在两块玻璃板之间的氖气放电发光作用，玻璃板上配有纵横交错的电极细线，这些电极细线的交点上放电时所形成的光点便可构成所要显示的文字或图像。由于这种显示器没有闪烁现象，因而对眼睛造成的疲劳较小。随着科学技术的进步，现在已经有了全彩色的大型等离子体显示器。

串行打印机

• **串行打印机**(serial printer) 这种打印机有活字式和针打式两种方式，二者都是通过把色带上的色汁打到纸上来实现打印的。个人计算机所配置的打印机多为针打式。

行式打印机

• **行式打印机**(line printer) 这种打印机能以行为单位进行打印，主要用于通用计算机。它有垂直行走的滚筒式和水平行走的色带式等。

热敏打印机

• **热敏打印机**(thermal printer) 这种打印机是通过把电信号变换成热，并以点阵的形式把文字和图形记录到纸

上的。记录方式有两种，一种是由热敏头直接打印的热敏纸方式，另一种是利用涂敷了热熔性墨粉的色带来进行转印的热复印方式。

喷墨式打印机

• **喷墨式打印机**(ink jet printer)　这种打印机是通过把微粒化了的墨滴喷到纸上来实现打印的，它具有速度高、噪声小的特点，并且容易彩色化。现在，利用这一方式制成的彩色打印机已相当普及。

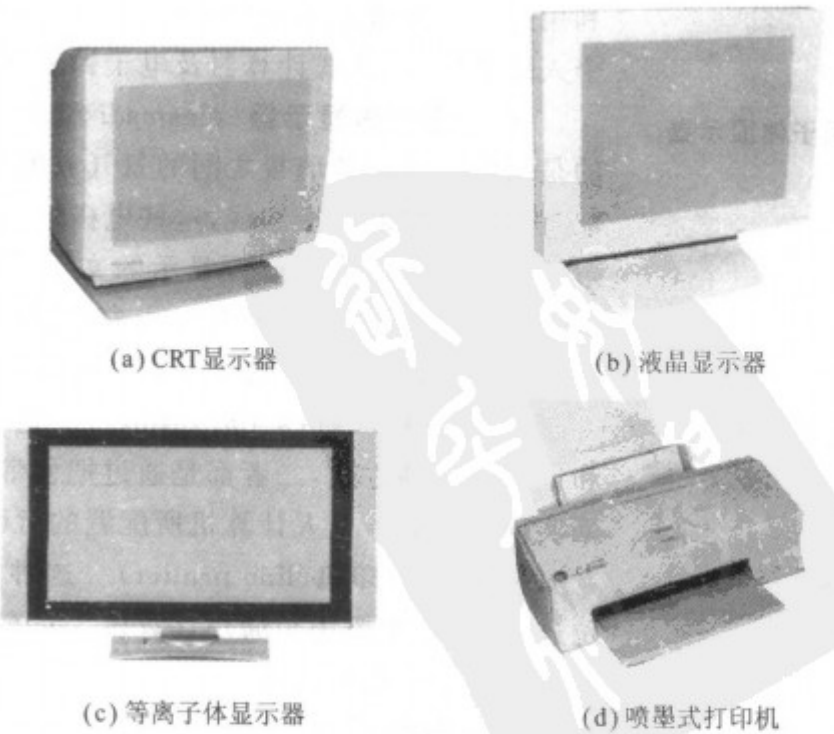
激光打印机

• **激光打印机**(laser beam printer)　这种打印机的工作原理是先把受控激光束照射到感光鼓上，使感光鼓上形成与文字或图形相同的静电图像，再利用静电作用让色粉附着在纸上，并对色粉加以固化而最终将打印内容牢牢记录下来。

X-Y 绘图仪

• ***X-Y* 绘图仪**(*X-Y* plotter)　*X-Y* 绘图仪有两种：一种是滚筒式，绘图时，卷贴在滚筒上的纸前后滚动，绘图笔左右移动。另一种是平面导轨式，绘图时纸是固定不动的，通过绘图笔在 *X*、*Y* 两个方向上移动来画图。绘图笔的动作是由脉冲电动机来驱动的。

图 6.9 是几种输出装置的实物照片。



(a) CRT显示器　(b) 液晶显示器　(c) 等离子体显示器　(d) 喷墨式打印机

图 6.9　输出装置实例

6 辅助存储装置

要 点

主存储装置直接与微处理器相连，因而它的读写速度非常快，但存储容量小。为了对存储容量加以扩充，常常需要接入辅助存储装置，特别是常采用磁盘装置来启动操作系统和暂时隐蔽存储器。

个人计算机在有了 Windows98 之后已能够与 USB（Universal Serial Bus，通用串行总线）接口相对应，使辅助存储器的扩充变得很简单了。

解 释

磁盘装置（magnetic disk strage）

硬盘

磁盘是一种在铝质圆盘上涂有磁性体并可用磁头来读、写数据的存储装置，通常称为**硬盘**。与其他辅助存储装置相比，硬盘的读写速度高，容量大，常作为虚拟存储装置而用于存储器的暂时隐蔽。

软磁盘存储装置（flexible disk strage）

软盘

它是一种在软塑料片的两面涂上磁性体并将其封入方形片套内的存储装置，通常称为**软盘**。软盘一词是它的商品名称，其标准尺寸本来定为 8in（1in＝2.5cm。），而现在 3.5in 已成为主流。3.5inDOS/V 格式软盘的存储容量为 1.44MB。

光磁盘（MO：Magnet-Optical Disk）

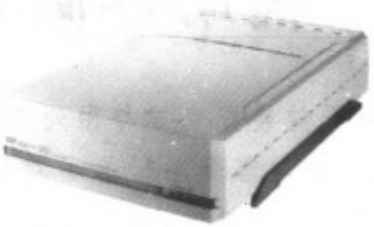
它是一种在圆形塑料等基片表面涂上强磁性材料，并通过边加磁通量边用激光照射的办法使材料磁化方向反转，从而实现读、写的存储装置。光磁盘的存储容量很大，一般为 230MB～1.3GB。

CD-R 和 CD-RW（Compact Disk Recordable Disk 和 Compact Disk Rewritable Disk）

CD-R 是与 CD-ROM 有互换性的压缩光盘，可以用专用的软件写入数据。CD-RW 是可擦除光盘，只要予以格式化，就可以像软磁盘那样使用。



磁盘



CD-RW压缩光盘



光磁盘

图 6.10 辅助存储装置实例

图 6.10 是几种辅助存储装置的实物照片。

DVD ± R, DVD ± RW, DVD-RAM (Digital Versatile Disk Recordable, Digital Versatile Disk Rewritable, Digitale Versatile Disk-RAM)

DVD±R 是与一般 DVD 播放机有互换性的光盘，2 层式的 DVD±R 能记录 8.5GB 的数据，一层可记录 4.7MB。

DVD-R 与 DVD+R 的规格不同，在使用专用驱动器的情况下，如果将 DVD-R 与 DVD+R 拿错了，数据就无法写入。这个问题可以通过采用能适应两种规格的多格式驱动器予以解决。

DVD±RW 是能够改写 1000 次的光盘，其容量和规格与 DVD-R 相同(见表 6.1)。

表 6.1 CD 装置和 DVD 装置的方式和特点

装 置	方 式	存储容量	特 点
CD 装置	CD-ROM	700 MB	读出专用
	CD-R	700 MB	只能写一次
	CD-RW	700 MB	能反复读写
DVD 装置	DVD-ROM	4.7 GB	读出专用
	DVD-RAM	9.4 GB	读写通用
	DVD-R	4.7GB/8.5 GB	只能写一次
	DVD-RW	4.7GB/8.5 GB	能反复读写
	DVD+R	4.7GB/8.5 GB	只能写一次
	DVD+RW	4.7GB/8.5 GB	能反复读写

DVD-RAM是可以两面使用的统一规格光盘，存储容量最大可达9.4GB，写入次数可达10万次。由于它是盒式封装的，因而易于保存。其缺点是不能用一般的DVD播放机播放。

非易失存储器

把数码照相机存储媒体所使用的存储器连接到USB接口上，也可以构成存储装置。这种存储装置不但可以写入数据，而且当电源关断时数据不会丢失。其种类也很多，有压缩闪存(compact flash)、SD存储卡(SD memory card)、存储棒(memory stick)、敏感媒体(smart media)、USB存储器(USB memory)等。

用USB接口把数码照相机的图像接到个人计算机上，图像即可直接传到计算机中。此外，有的USB插口本身就直接带有存储器，如读卡器和USB存储器等。图6.11是存储棒的实物照片。



图6.11 存储棒实物照片

相关知识

◆ USB存储器的等级(USB storage class)

USB存储器的等级可以通过把存储卡直接或经由卡插口间接连接到USB接口上，由个人计算机作为辅助存储装置来加以识别。

笔记本式个人计算机的扩充性较差，USB存储器常作为其扩充辅助存储装置的手段来使用，市场上正在销售的各种机器都带有USB接口。

题外话

希林格利用电流的磁效应制成了通信机

希林格是曾默林格的朋友，他在俄罗斯驻慕尼黑大使馆工作的时候，曾经看过曾默林格的通信实验。那时候他就曾经想过，“这个实验中用了那么多的电线，还用了电解作用，实用化的时候肯定会很困难”。这一时期，丹麦人奥斯特已经发现了具有划时代意义的电磁效应，就是那个电流流动能使指南针的磁针摆动的效应。舒拜伽、昂贝尔、希林格等人都曾经试图利用这种电磁作用来制造通信机，而只有希林格的通信机最有特点。希林格的通信机只用了8根电线，2根作为呼叫线来用，另外6根线用于控制6个磁针的摆动，并由这6个磁针的摆动组合成字符来表达通信内容。这种方法也引起了其他国家的反响，从而形成了对通信机的研究热潮。

7 操作系统

要 点

所谓操作系统(OS),就是一个基本软件。这个软件处于用户或应用程序与硬件之间(见图 6.12),其作用是保证计算机高效运行。

解 释

操作系统的作用和组成

假如键盘和打印机等输入输出装置及主存储装置是由各自不同的程序进行管理的,那么,硬件就会因为相互竞争而不能同时启动。为此,可采用由操作系统把应用程序的共同部分统一管理起来的办法,让不同硬件的程序在同一个操作系统下互不影响地运行,这样不但可以避免竞争,而且还可以减小程序的开发量。

操作系统是由一个称为"任务"(task)的单元来管理程序等的执行权的。从 Windows95 开始,操作系统发展成了能同时执行多个程序的多任务操作系统,它能够在考虑到系统整体效率的同时首先执行优先程度高的任务。

任务是操作系统的内部单元,此外还有一种称为"作业"(job)的单元,它是在用户把处理程序等委托给操作系统去执行时的工作单元。

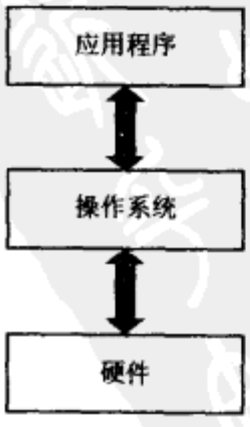


图 6.12 操作系统在计算机中的位置

操作系统的处理方式

批处理

• **批处理**(batch processing)　它是一种当数据积累到一定数量或者每隔一定的时间进行一次集中处理的方式，也称为批处理或一揽子处理，其优点是处理效率高。

实时处理

• **实时处理**(real time processing)　它是一种一有处理请求就立即进行处理的应答式处理方式，也称为即时处理，银行里的ATM机在存钱或取钱时就相当于这种处理。

相关知识

◆ **MS-Windows**

MS-Windows是个人计算机中使用最多的操作系统，它能够利用图形用户接口GUI(Graphical User Interface(图形用户界面))在同一画面上执行多个程序。

◆ **UNIX**

UNIX是AT&T研究所于1969年为工作站所开发的操作系统，它是C语言编程的开端。

◆ **Linux**

Linux是个以芬兰学生利努斯·托瓦尔兹(Linus Torvalds)为核心所开发出的专利，它是开放源操作系统。操作指令与UNIX相同，经过世界上多位开发者的改进后，其完善度很高。它有多个分配器，核心部分是共同的，汇总了各种操作指令、编辑器、程序编译器、视窗系统等的组件。

◆ **Mac-OS**

Mac-OS是Macintosh用的操作系统，各种操作系统中率先采用了GUI。

8 程序语言

要 点

用于对计算机进行控制的程序语言有许多种，既有直接控制硬件的机器语言，也有与人的语言相近的高级语言，各种语言都有其不同用途和特点。

解 释

解释与编译

程序语言的执行有解释和编译两种方式。解释方式是按顺序边翻译边执行，编译方式则是首先进行翻译，然后再编成可执行模块才予以执行的。编译方式的执行速度比解释方式快。

低级语言

机器语言

- **机器语言**(machine language) 这种语言随 CPU 的不同而异。由于其指令随硬件不同而异，因而没有互换性。又由于它是用十六进制数表示的，因而难以解读。

汇编语言

- **汇编语言**(assembly language) 它是一种用助记符来表示的语言，比机器语言稍微好懂一些。

高级语言

COBOL 语言

- **COBOL 语言**(Common Business Oriented Language) 它是主要用于大型计算机事务处理的语言。

FORTRAN 语言

- **FORTRAN 语言**(Formula Translator Language) 它是主要用于科学计算的语言。

C 语言

- **C 语言**(C language) 它是 20 世纪 70 年代为开发 UNIX 而开发的语言。现在，几乎在所有的操作系统都中均能使用。

Java 语言

- **Java 语言** 它是 Sun 微系统公司开发的面向对象的语言，如果 Java 的运行环境(JVM:Java Virtual Machine)条件相同，则相同的程序不需经过重新翻译即可在不同环境下运行。

BASIC 语言

- **BASIC 语言** (Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code) 它是一种由简单易懂的英文所构成的计算机语言，其语法、数据的种类、结构等都很简单，且容易记忆，因而常作为编程入门时使用。

9　互联网

要　点

互联网(internet)起源于1969年所建成的美国国防部计算机网。1983年军用部分分离出之后，这个计算机网便作为以科研和教学为目的的计算机网络而发展了起来，各学术研究等机关纷纷按照共同通信协议(protocol)把各自的服务器型计算机连接，于是便形成了互联网这个把全世界都连成一体的庞大计算机网络。

解　释

互联网

互联网是一个遍布全球的大网络，它不仅连接着大城市，就连中小城市和村镇也都连接上了，形成了规模巨大的“信息高速公路”。

1989年WWW(World Wide Web的缩写，也简称为Web，万维网)的开发和1993年WWW浏览器的面世进一步促进了互联网应用的发展，现在，它不但能传送电子邮件、网络新闻及各类文件，而且能自由交换图像、电影、声音等多媒体信息，也就是说，它已经发展成为多媒体网络了。图6.13示出了互联网的大致情形。

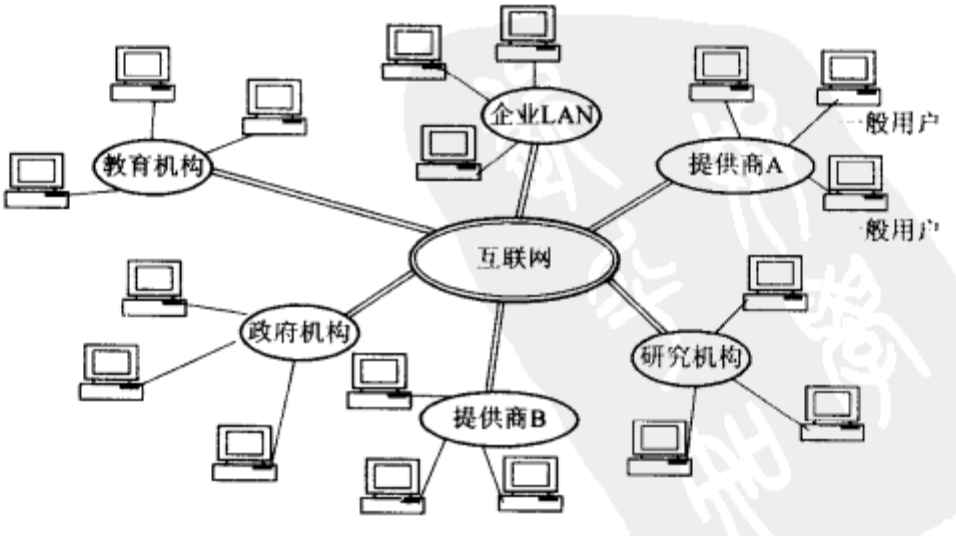


图6.13　互联网概貌

从图 6.13 可知，互联网是由许许多多的网络相互连接而成的，它就像蜘蛛网一样四处延伸着，其终端还连接着各种各样的局域网(LAN：Local Area Network，局域网)。

日本在 1994 年后期到 1995 年这段时间里对互联网的认识提高得很快，其原因在于 1995 年的 1 月发生了阪神淡路大地震。那时候，众多的通信网都因为地震而中断了，而互联网则作为唯一的在灾害时期的通信手段而发挥了巨大的作用。

协议

互联网是按照称之为 TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol)的**协议**进行数据交换的。这里所说的协议，就是在互联网上传递信息时的传输控制顺序。TCP/IP 是作为个人计算机的标准操作系统来配置的。

互联网业务提供商

ISP

如果人们要使用互联网，就要把自己的计算机接到构成互联网的服务器上。研究机构、公共机构、企业等可以经由局域网来连接，没有服务器的企业和个人就得与**互联网业务提供商**(**ISP**：Internet Service Provider，以下简称为提供商)签订服务合同。以前，个人和没有服务器的企业主要采用电话**拨号连接**的方法，也就是通过拨打提供商所设置的接入点电话来连接互联网(当然要收电话费)。近年来，由于高速大容量的**宽带网**(ADSL、光纤通信等)已经普及，随时连接互联网已成为可能，这种连接称为 **IP 连接**。宽带网不仅可以用于互联网，企业内部局域网的构建等也都可以采用。

拨号连接

宽带网

IP 连接

由于宽带网能实现高速大容量通信，因而以往用文字信息来收、发的邮件也可以用语音、静止图像及活动图像来收、发了，Web 站点上还可以进行快速阅读，互联网的使用变得更加舒适了。

相关知识

◆ ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line)

ADSL 是一种利用以往的老电话线(铜线)，通过扩展其频带宽度的办法来实现高速大容量通信的通信方式。这种通信方式的上行(从用户住宅到电话局)通信速率为 64Kbit/s～1Mbit/s，下行(从电话局到用户住宅)通信速率为

1.5～8Mbit/s。由于其上、下行通信速率不同，因而称为非对称数字用户线路传输方式(ADSL)。

ADSL在进行数据通信时所使用的频带为4kHz～2.2MHz，它的频率高于普通电话的声音传送信号频率(300Hz～3.4kHz)，因而二者不会相互干扰。

要想接受ADSL业务，只需像图6.14所示那样接上ADSL调制解调器、分离器和模块插座就行了。

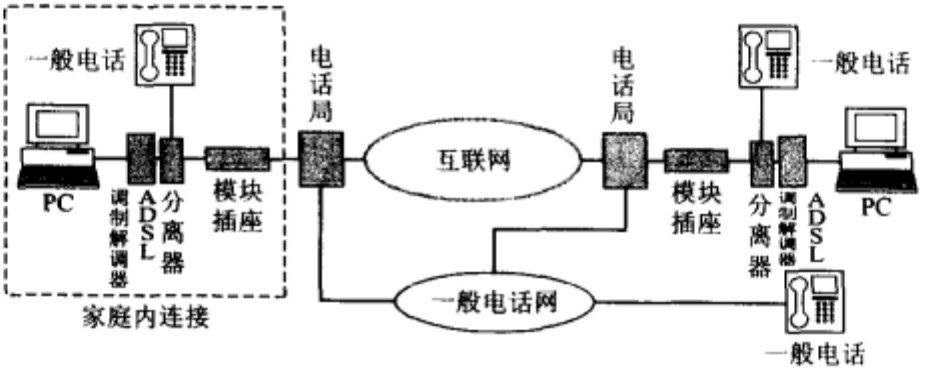


图6.14　ADSL线路使用实例

来自电话线路的数据通信信号和普通电话信号由分离器进行分离后，电话信号被直接送到电话机中去，这是一般的电话功能。分离出的数据通信信号被送往ADSL调制解调器，在调制解调器中进行模拟与数字的转换后，再交给个人计算机进行处理，这是数据通信功能。调制解调器担负着模拟信号与数字信号的双向变换作用。

这样，即使不配置光缆等基础设施，延用现有的电话线路也可以按照高于ISDN线路的通信速率进行数据通信。

这种利用现有的电话线路网由高端频带来进行数据通信的高速通信技术，总称为xDSL(Xdigital Subscriber Line)，它又有一些具体不同的方式。

① SDSL(Symmetric DSL)：这种方式的上、下行传输速率相同，都是160k bit/s～2M bit/s。

② VDSL(Very high bit rate DSL)：这种方式的传输速率是超高速的，但传输距离短，一般只有300～1500m，实际当中多用于从光缆线路变换成VDSL后接到集中式住宅中去的场合。

利用个人计算机进行数据通信的情况下，xDSL和个人计算机由以太网(Ethernet)电缆来连接。

在日本，除了NTT(日本电信电报公司)从1999年12月起提供的ADSL服务外，还有其他一些ADSL提供商提供的这类电信服务。

10 协 议

要 点

以互联网为首的信息通信是建立在符合各自目的协议之上的。互联网所使用的标准协议是 TCP/IP 协议。

解 释

TCP/IP 协议

“协议”一词的原义有“外交礼仪”等意思，在信息技术领域中，它的含义是计算机之间进行通信时的通信手段、数据的形式、连接机器的各种顺序及约定事项等。TCP/IP 协议是由名称分别为 TCP 和 IP 的两个协议组合而成的协议，它是用于计算机通信的协议。

就通信顺序而言，首先是 IP 在互联网线路上起作用，根据 IP 地址把数据送到接收方的计算机上。数据是被分割成称为数据包的细小单位来发送的，发送数据时，数据包的前端附加上了称为数据包头的接收地址信息。互联网上的路由器等通信设备检测到发送方所发来数据的 IP 地址后，就按这个地址把数据传送到接收方计算机所连接的网络上。数据到达接收方的计算机上以后，就是 TCP 的事情了。

TCP 首先对所收到的数据进行检查，看数据有没有损坏，如果有损坏，它就要求发送方再发送一次数据。此外，数据发送方在收不到接收方关于是否已收到数据的应答信息时，也会主动再发送一次数据。

接收方收到数据后，将对发送来的数据按次序重新排队。这样做的原因是由于数据是经过分割打包后传送过来的，而数据包的次序在传送途中有可能已被打乱了的缘故。

在 Web 浏览器或邮件软件等使用 TCP/IP 的应用中，为了把自身地址的数据与其他 TCP/IP 应用程序区别开来，要利用 TCP 端口编号。作为主要的协议，其名称有 HTTP、TCP、IP、PPP 及 MNP 等。

例如，在互联网上阅读 Web 网页时，Web 浏览器和 Web 服务器是用HTTP这个协议进行通信的，HTTP则使用了 TCP 和在它的下面进行具体通信的 IP 这两个协议。

IP 地址(IP address)

IP 地址是为了识别互联网上所连接着的计算机而给每个计算机所分配的地址。它由 4 个字节(32bit:8bit×4)的数字序列构成,即把 32bit 按每部分 8bit 分成 4 部分,并且每部分是转换成十进制数表示的。分配给连接在互联网上的各个网络的 IP 地址是一元化管理的。

相关知识

◆ PPP

连接在互联网上的计算机的 IP 地址是一元化管理的,而在与提供商签订的合同中,能分配的 IP 地址已经快要饱和了(不久的将来,IP 地址的位数将会改为 16B,即 128 bit),内部局域网中的 IP 地址是作为个人局部地址经过 IP 变换后连接在外部互联网上的。

一般用户在连接互联网的时候,要和互联网提供商签订合同。这种情况下,用户计算机与提供商计算机采用称为 PPP(Point to Point Protocol)的协议,到达提供商路由器前的这段距离由电话线连接。这个协议也可用于计算机之间的通信。

题外话

有线通信的实用化是画家莫尔斯开创的

1828 年,美国人亨利发明了强电磁铁,莫尔斯利用这种电磁铁实现了远距离通信。莫尔斯本来是一位画家,在从欧洲经大西洋回国的船上,他偶尔看到了一位同船乘客从巴黎买回来的电磁铁。莫尔斯对这个电磁铁很感兴趣,但他没有电气方面的知识。回国后他请教了当时在哈佛大学任职的亨利教授,没过多久就想出了一种用点划组合来表示字母和数字的编码方法,并利用电磁铁按这种编码方法实现了通信,这就是莫尔斯电码和莫尔斯电报机。

莫尔斯的电信系统完成于 1844 年,这一年的 5 月,华盛顿与巴尔的摩之间便开通了长达 60km 的电信线路,所发出的第一封电文是"What hath God Wrought(神赐之物)"。

11 WWW

要 点

如前所述，WWW（即 Web，万维网）有“蜘蛛网”之意，也就是说，WWW 是个像蜘蛛网一样遍布全世界的大规模网络。该网络是个信息共享系统。

解 释

WWW

互联网是由下列四种技术构成的：

HTTP

① 数据传输协议 **HTTP**（Hypertext Transfer Protocol）；

URL

② 指定文件所在场所的 **URL**（Uniform Resource Locator）；

HTML

③ 文件描述语言 **HTML**（Hypertext Markup Language）；

MIME

④ 指定数据形式的 **MIME**（Multipurpose Internet Mail Extensions）。

链接

WWW 所公布的文件中设置有可以调用其他文件的**链接**功能，有了这个链接功能，位于不同管理者的计算机内的信息就可以连在一起进行处理了。

所处理的数据既可以是文本数据（文字信息），也可以是语音、静止图像、活动图像等各种多媒体信息。这些都是因为已经可以利用 Web 浏览器（Netscape Nevigator，Mosaic，Internet Explorer 等）和能够对全世界的服务器进行访问的缘故。

入口地点（主页）

入口地点

所谓**入口地点**（portal site），指的是用户在互联网上进行信息检索时最先进入的 Web 网页。入口有大门之类的意思，它位于封面或者目录上，有时也称为**主页**。

主页

现在，当说到互联网信息服务时，一般都是指 WWW，WWW 数据网页的文件检索和阅览要使用 Web 浏览器。

Web 浏览器（Web browser）

它是用于阅览（浏览）互联网上的Web网页的软件。

Web浏览器

Web浏览器也简称为浏览器，美国的 Netscape · Commnnicatioms 所开发的“Netscape Navigator”和美国微软公司的“Internet Explorer”是具有代表性的浏览器。

Web网页

互联网上所公布的文件称为**Web网页**，它是用 HTML 语言等写成的，登录着文件和图像等各种 Web 目录。这个地点称为 Web 站点。

相关知识

◆ HTTP

HTTP 是个从 WWW 中的 Web 服务器对 Web 浏览器传送 HTML 文件和图像文件时所用的数据传输协议，它是在互联网的标准协议 TCP/IP 上工作的。

◆ URL

URL 是个用于指定互联网上信息获取场所的标识符，将其输入到 Web 浏览器中，即可取出必要的信息。例如，如果 URL 为

http://www.OOO.co.jp/×××

那就表明它是用 HTTP 协议来访问域名为 www.OOO.co.jp 的服务器，位于名为×××处的对象文件的内容就会显示到 Web 浏览器上。

◆ HTML

HTML 是用于描述 Web 网页的文件描述语言，它能够处理含有图像、语音、视频等内容的文件，并采用特征标志来描述文件的构造、轮廓及下一个文件链接等信息。

最近的日文汉字处理软件、表格计算软件、建筑图渲染软件等，都备有能把已制作成的文件变换成 HTML 的功能。

◆ MIME

MIME 是一个用于经由互联网来发送各种数据的扩展功能。随着互联网在全世界范围内的普及，非英语语言数据及图像等多媒体数据的数据交换问题突现了出来，于是，互联网技术开发组织（IETF：Internet Engineering Task Force）将这一需要作为互联网邮件等的数据扩展功能策定了下来。

MIME 的主要作用是数据变换。例如，当要把图像文件这样的二进制数据文件附加到互联网邮件上时，由于互联网只能交换文本文件，因而要一齐变换成（编码）文本文件，然后才予以发送。邮件接收者在把编过码的文件恢复成

原来文件的时候，其变换方法由 MIME 来决定。

◆ **二维码(QR 码:Quick Response Code)**

与一维的条形码不同，二维码是一种平面码。平面码的纵横方向上都记录着信息，因而存储的信息比条形码的信息量大，一般情况下，二维码中能写入 4296 个英文字母或者 1817 个汉字。

二维码能够利用带有照相功能的手机简便地读入互联网中，其存取方法就像拍照片一样，也就是利用了手机所具有的码读取功能。互联网的 URL 和发送端的邮件地址可以用这种操作简便输入。

题外话

向出门人进一言

现如今，几乎每个年轻人都有一部手机，手机已经普及到了很难找出一个没有手机的人的程度。而另一方面，手机的普及和公用电话的锐减有时也会使人遇到不方便的事。不光是手机，平日里总是带着笔记本电脑等信息设备去工作或者旅行的人也在增加，通常称这些人为“出门人”。对于出门人来说，如果电池的电用完了，带着的手机和笔记本电脑也就变成失去魔法的魔盒了。因而，出门时一定要带上备用电池，否则就需临时就近去买。也许在买不到电池时你会想到就近找一个能充电的插座来给自己的电池充电，向人家说“请让我用一下这个插座吧!”然而要知道，这种事本身就谈不上是不是会被拒绝的事，“白用电”就像“白吃饭”一样，是不可以去做的事。

12　电子邮件

要　点

只要是位于互联网环境里的人，任何人都可以利用电子邮件(E-mail：Electronic mail)随时向全世界任何地方发送信息。但是，电子邮件的保密性不高，它是一种不盖邮戳的信件，或者像个明信片，途中被偷看的可能性很大。另外，电子邮件是沿着各种路径边摸索前进边投递的，有时候会发生去向不明的问题。

解　释

电子邮件的，发接结构

邮件地址仅供其用户使用，在全世界范围内都是唯一的。图 6.15 示出了互联网邮件的发收结构。

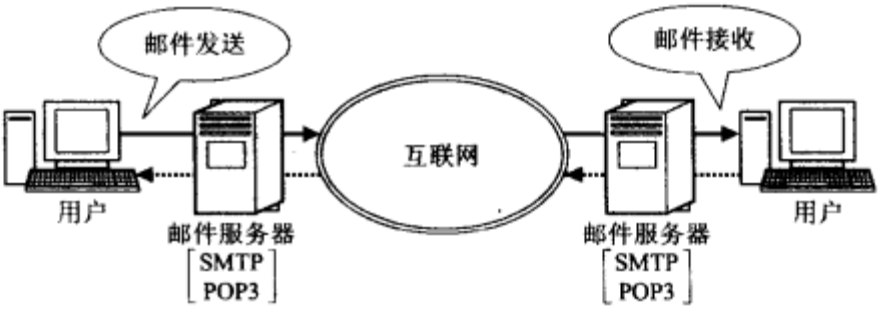


图 6.15　电子邮件的发收结构

SMTP
邮件服务器
POP3
IMAP4

用户发送邮件及邮件服务器之间传送邮件时所用的协议是 **SMTP**(Simple Mail Transfer Protocol)，用户从**邮件服务器**那里接收邮件时所用的协议是 **POP3**(Post Office Protocol Version 3)或 **IMAP4**(Internet Message Access Protocol 4)。它们被称为 SMTP 服务器和 POP 3 服务器，是配套使用的。POP3 的口令是未经加密就在网上流动的，通信途中有可能被盗取。为此而对其进行了改进，口令经过加密处理的服务器是 **APOP**(Authenticated POP)。

APOP

IMAP 4 更为灵活一些，它能够把特定邮件留在服务器中，也能够在服务器上对信息进行检索，因而受到了人们的重视，有可能取代现在还是主流的 POP3 而成为下一代协议。

电子邮件的收发不仅可以采用文字形式，而且可以是添加了照片之类的静止图像或活动图像的文件。此外，无论接收者在与不在，邮件都可以发送，接收者也可以在自己认为合适的时候打开自己的信箱（设置在服务器上）来阅读。图6.16示出了邮件地址的一般构成。

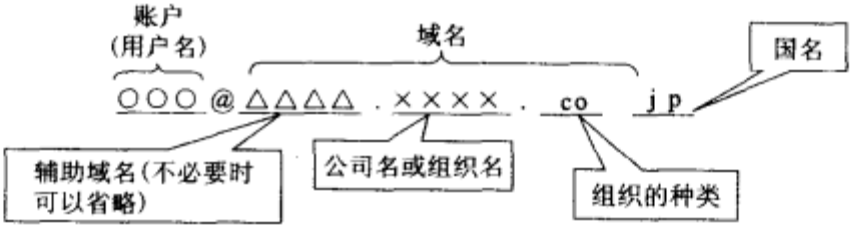


图 6.16 一般的邮件地址

账户
ID
域名

账户(account：用户名)是用于识别用户的代码或符号，也可以认为它是与**ID**(identification)相同的东西。“@”(分隔符)后面的部分称为**域名**(domain name)，它用于寻找对方邮件服务器在什么地方。

由于信息送达对方服务器的路径不固定，因而有时候会因为途中遇到了麻烦而到不了对方所在地。这时，绝大多数情况下都没有故障信息送回发送侧。大企业的网络往往是按部门由多个网络组成的，采用辅助域名的情况较多。

在美国，由于延用了互联网最初建成时的域名，因而有些场合(·com)不用国名，此外的场合都用“us”。表6.2示出了主要组织的种类和国名的缩写。

表 6.2 主要组织的种类和国名缩写

组织的种类	识别符号
企业或法人	co(com)
提供商等	ne(net)
各种团体	or
大学及专门学校	ac(edu)
国家机关	go(gov)

国名	缩写	国名	缩写
澳大利亚	at	印度	in
加拿大	ca	意大利	it
中国	cn	墨西哥	mx
法国	fr	葡萄牙	pt
希腊	gr	韩国	kr

公司内部的邮件是将信息储存在局域网上的邮件服务器里的，各个用户可以用ID和口令读出该服务器里自己地

址下的信息。个人计算机通信邮件也是以同一主计算机为中心进行邮件交换的。由于公司内邮件和个人计算机通信邮件中的大多数都与互联网邮件相对应，因而它们能够经由互联网来收发。

相关知识

◆ 电子邮件发送方法

电子邮件的发送与纸质信件一样，也要写明投送地址。此外，电子邮件还可以用下面的方法把一个邮件同时发送给多位收件人。

① Cc(carbon copy)：这种方法在把同一内容的邮件发送给指定收件人以外的多位收件人时，也通报了所有收件人的邮件地址。

② Bcc(blind carbon copy)：这种方法在把同一内容的邮件发送给多位收件人时，不通报收件人以外的邮件地址。

信箱内的邮件要定期查看。如果不查看而一直放在里面，送来的邮件有时会超过信箱的容量，这种情况下，后面送来的邮件就收不到了。

题外话

骚扰邮件(垃圾邮件)

电子邮件给人们带来了极大的方便，然而，近年来骚扰邮件(垃圾邮件，spam mail)也多了起来。这些骚扰邮件大部分是一些商品宣传广告，其中也有恶性欺诈行为。这些邮件地址大都是从互联网上得到的，被骚扰对象多是非特定人群。恶性邮件不仅骚扰了收件人，而且挤在一起大量流入互联网还会加重通信线路的负担，是个不容忽视的问题。

当互联网上有人打听你的地址或口令时，要特别注意不能泄漏。另外，无关的邮件不要去理会它，更不要随便打开和回信。

骚扰邮件很狡猾，很难个别对付。因此，各有关公司联合起来设立了新对策小组 JEAG，开始从技术上采取措施。这类措施有：① 发送域名认证技术(查问域名是否有伪装)；② 导入能控制用户发送骚扰邮件的“拦截系统”；③ 对用户加强教育。简单地说，就是设置能判断真假邮件的服务器和能把伪装域名分开的机制。

13 电子购物

要 点

伴随着互联网的普及，电子购物也日益活跃。电子购物的好处是人们能够坐在家里便轻松地买回想买的东西，但是一旦出错，也很容易遭受巨大损失。究其原因，就在于买方完全见不到卖方的缘故。

解 释

电子购物

网上交易

电子购物（亦称为**网上交易**）提高了人们生活的便利性，日益呈现出其灵活性。消费者在浏览互联网上的虚拟商店（virtual shop）时，如果有自己想要买的东西，就可以直接在画面上或者通过电子邮件来订购。

这种购物方式的优点是既不需要出门，也不会耽误时间，还能够买到附近商店买不到的东西。但是，当要购买的时候，往往难以判定对方是否确实存在，或者其可信程度令人担心。例如，付过款后东西不到怎么办，送来的东西与网站上所看到的不一样怎么办，等等。事实上，已经有过不少的负面报道：一种是付了现款后没有收到所要买的东西，另一种是用信用卡付款时卡号被滥用了。

中介公司

通过图 6.17 所示的**中介公司**（escrow）来进行电子购物就安全得多了。中介公司是专门在出售方和购买方之间进行中介服务的公司，当然还要收取中介服务费。整个交易的手续如下。

① 出售方把成交结果告知购买方（即中标方）。

② 购买方把货款付给中介公司。

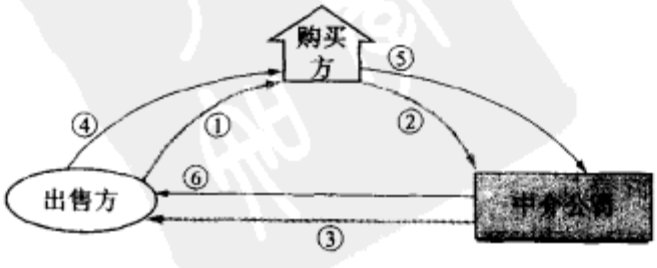


图 6.17 电子购物的机构

③ 中介公司收到货款后告知出售方。

④ 出售方向购买方发货。

⑤ 购买方将到货情况告知中介公司。

⑥ 中介公司把货款转交给出售方。

这种通过中介公司来进行交易的方式可以避免因为欺诈而遭受损失。下面是几种互联网交易中曾发生过的事件：

- 汇出货款后没有收到货物。
- 收到的货物与所订购货物不同。
- 泄漏了信用卡号等个人信息。
- 收到了莫明其妙的账单。
- 收到了莫明其妙的货物和账单。

特别要提醒的是，这种十分方便的电子购物方式是有不少漏洞的，并且，运用法律监督还有相当的困难。

相关知识

◆ 网络欺诈(online fraud)

利用互联网和电子邮件进行诱惑欺诈的行为经常发生。例如，色情网站以伪造的账单和欠条等名目来勒索高额钱财就是其中之一。还有一类就是用“完全免费”或者“入会者可获百分之多少的免费赠送”之类的花样来招揽顾客。这种情况下，如果顾客信以为真而按免费赠送的百分点进行了消费，过后就会收到高额账单，若去询问，回答却是“赠送的百分点已在入会手续中全部用完了”。这种用甜头来引诱顾客上当的花样里隐藏着巧妙的犯罪行为，因而必须提高警惕。

如果受到了网络欺诈行为的困扰，可以到以下的咨询窗口去咨询(在日本国内)。

① 国民生活中心

http://www.kokusen.go.jp/map/

② 警视厅

http://www.keishicho.metro.tokyo.jp/haiteku/haiteku/haiteku30.htm

③ 警察厅

http://www.npa.go.jp/hightech/soudan/hitech-sodan.htm

④ 互联网消费者损失对策律师团

http://www1.neweb.ne.jp/wb/licp/

⑤ 互联网热线联系协议会

http://www.iajapan/org/hotline/

如果收到了伪造账单邮件，要冷静地加以判断，弄清发件人是谁。如果自称是“××债权回收机构”或“××债权回收企业”的话，最好不要打开或回信，因为债权的转让必须预先通知当事人，否则就是违法的。对于伪造账单邮件，如果回信说“这件事我不明白”，那就等于确认了自己的邮件地址，其结果就会继续收到大量的伪造账单邮件或者各种乱七八糟的劝诱邮件。对于与己无关的邮件，千万不要去打开或回信。

题外话

IT社会中的虚拟现实问题

生活在IT社会之中，人们经常会听到“虚拟现实”(virtual reality)这个词。虚拟现实技术原本是一种利用计算机制作出人造图像空间，并让人进入这个空间中去进行各种体验的信息技术。为了使体验具有现实感，就要有能够对人的各种感觉器官产生刺激作用的显示装置，如利用阴极射线显像管、等离子体显像管、液晶显像管等所制成的图像显示装置；能够构成实时三维音响空间的声音显示装置；以及触觉信号的显示装置等。

虚拟现实技术已经在许多领域得到了应用。例如，在建筑领域中，这种技术可以用来对尚未完成的建筑物或城市空间进行虚拟合成，在此基础上从各种不同角度上加以研讨，从而设计建造出更好的生活空间。这种技术是通过扩展人的身体感觉来进行更高级体验的。

然而，这种虚拟空间在给人以梦幻般高级体验的同时，有时也会导致把假想与现实混同在一起的危险想法和行动，因而在应用虚拟现实效果的同时，一定要充分认识和区分虚拟世界与现实世界之间的差别。

14　计算机安全问题

要　点

这里所说的计算机安全指的是针对信息系统所受到的各种威胁而采取的防护措施。

解　释

非正当访问

伴随着互联网的普及，利用非正当访问进行网络犯罪的行为急剧增多。这种犯罪行为是网络时代的特有问题。专门进入主计算机中去干窃听、篡改数据、破坏系统等恶性犯罪行为的人称之为“**黑客**”(cracker)；并非出于恶意而进入公司内部网络中去偷看的人称之为“**骇客**”(hacker)。这两种人都必然掌握着网络方面的详细知识和技术。

黑客

骇客

作为对付网络犯罪的措施，通常是在局域网的入口处设置**防火墙**来阻挡非正当访问和计算机病毒的侵入。图 6.18 示出了防火墙的大致情形。

防火墙

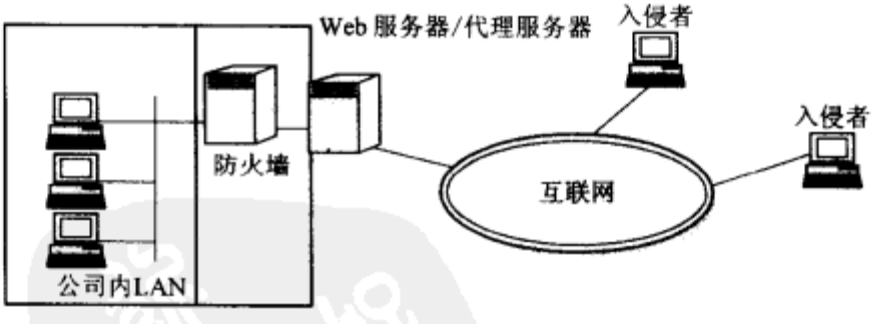


图 6.18　互联网与防火墙

与互联网(internet)一词中的 inter 是“相互”的意思相对应，**内联网**(intranet)一词中的 intra 是“内部”的意思。互联网是联接着全世界的不同计算机网络的大网络，而内联网是范围仅限于企业或组织内部的局域网络。

内联网

防火墙的设置对于防止外来入侵者是必不可少的，它能在一定程度上起到保护内部机密的作用，但并不完全。身份认证(biometrics identification：指纹、瞳孔、声音，手掌纹等的对照等)的方法能代替口令来更有效地对付非正当访问。身

份认证的方法始于银行业中防止 ATM 机犯罪的迫切需要。

多数情况下，防火墙的设置并不会影响从局域网内部通过简单的口令连接到外部互联网上。

计算机病毒

计算机病毒实际上就是一些起不良作用的程序，这种程序是制造者以干扰计算机正常工作为目的而编制的，由于它能像传染给人的病毒一样边繁殖边传播，故而称为计算机病毒。这种病毒一旦侵入计算机内部，就会潜入硬盘或软盘等特定场所，直接或间接地一边繁殖一边起破坏作用。

计算机病毒有许多种类，有的病毒在感染后有一个潜伏期，有的病毒会在特定的日子里发作，有的病毒则是在计算机启动过一定的次数后才会使计算机出现症状。因此，计算机病毒会在计算机使用当中不知不觉地通过电子邮件或软盘交换而传染给其他计算机，从而使破坏性不断扩大。计算机病毒大致可分为以下几种类型。

① 程序文件感染型：它以程序文件为传染对象。

② 导引扇区感染型：它以硬盘启动管理部分为传染对象。

③ 宏指令感染型：它是通过滥用应用软件的宏指令功能来传染给数据文件的。

计算机病毒的传染途径多为电子邮件、互联网下载文件及软盘等，因而，对于发送源不明的附加文件和出处不明的复制数据要十分注意。

信息处理推进机构(IPA)列举了以下 7 条防止计算机病毒传染的措施：

① 使用最新的防病毒软件进行病毒检查。

② 对数据进行备份，以防万一感染了病毒而遭受损失。

③ 如有被感染的可能，应立即进行检查，以防病毒漏掉。

④ 电子邮件的附件要先查毒后再打开。

⑤ 处理有可能感染病毒的文件时，不要自动运行宏指令功能。

⑥ 从外部拿来的软盘或下载文件要先检查再使用。

⑦ 共同使用的计算机要严格进行管理。

需要指出的是，防病毒软件并不能100%地去除所有病毒，对于新出现的病毒，仍需要自己下功夫导入相应的查毒软件。

灾害事故

灾害事故分为自然灾害和人为灾害。在日本这样的地震灾害和台风灾害事故多发的国家里，必须经常考虑应对灾害袭击造成机构瘫痪问题的对策。像新潟中越地震和苏门答腊海面地震那样的大灾害，如果是发生在大都市地区，全国的所有机构就都完全瘫痪了。

此外，还要考虑火灾及工程事故会造成通信线路中断的问题。作为这方面的对策，日本总务省给出的指导方针是“重要线路要设置备用线路”，这一要求表明了通信线路双重化的重要性。

加密处理

所谓加密处理，就是将文件按照某个规则加以变换后再进行保存，或者像图6.19所示那样在发送端给文件加上密码后再进行发送。这样，即使文件被第三者窃听或窃取了，他也无法知道内容是什么，这就使文件的安全性得到了提高。打个比方来说，如果把“欧姆社”三个字变换成“ABC”三个字母加以传送的话，第三者窃听到的是ABC，而ABC究竟代表着什么，窃听者是无法知道的。

加密处理后传送出去的文件，到了接收端必须能完整地恢复成源文件的形式。因而，加密时和解密时所用的“密码钥匙”（亦称为“键”）必须是相同的。加密处理可以采用各种方法，下面对图6.19所示的保密键加密编码方式（亦称共用键方式）和公开键加密编码方式加以说明。

（1）保密键加密编码方式

这种方式中，文件的变换规则（即“键”）是由发送方和接收方共同商定的。如图6.19所示，发送端把普通文件按双方约定的规则进行加密编码后变为密码文件，密码文件经传输线路到达接收端后，接收端再按与加密时相同的规则对密码文件进行解码（即解密）。

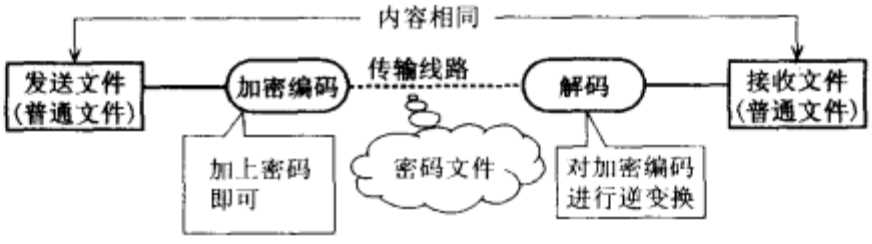


图 6.19 保密键加密编码方式示例

只要这个保密键的保管是严格的，无论是在互联网上被窃听，还是被入侵到计算机内部窃取了数据，窃取者都不能获得通信的内容。反之，如果这个保密键被别人知道了，文件就能被解读。因而，键的保管一定要十分注意。

(2) 公开键加密编码方式

这种方式中，加密编码当中与解码当中所用的键并不相同，它们是相互成对的，一个键是仅由本人掌握的保密键，另一个则是公开的，无论谁都可以掌握。

因为由公开键进行过加密编码的文件只有用保密键(亦称个人键)才能解码，所以发送文件内容只有接收者本人才能知道。采用这种方式的优点是键的保管比较容易，其缺点是加密编码和解码处理比较费时间。

相关知识

◆ 电子证件(digital certificate)

电子证件是在互联网上发行的用于证实个人和法人的存在、可靠性、正当性等的证明书，它是由作为第三者机关的认证局来发行的，能够用于证明持证者的身份和证件使用范围等内容的正确性。

电子证件采用的是公开键加密编码方式，它能够防止伪造和不正当使用。2000 年 4 月，日本对商业登记法的一部分进行了修正，创设了由登记官对法人代表的电子署名给予证明的电子认证制度。这种电子认证的效力与以往由登记所所发行的印鉴证明书和资格证明书的效力相当。已于 2000 年 10 月执行。按照这一制度进行商业登记时，登记所(即法务局)即为认证局。

此外，在互联网上使用信用卡进行账目结算时，信用卡公司便是认证局。

15 信息化社会中的道德问题与管理

要 点

在今天这个社会里，缺乏道德观念已成为一个大问题，各种各样的网络犯罪行为便是一个例证，这里面不但有侵犯他人权利的问题，也有暴露别人隐私等问题。

解 释

知识产权

知识产权

知识产权是对创造性劳动成果的认可和保护，包括技术成果和创意构思在内，文艺、学术、美术、音乐、程序等都受到知识产权的保护。知识产权的范围很宽，大体上可分为以下三个方面：

① 著作权(copyright)。

② 工业所有权(industrial property)，它包括发明专利权、实用新型专利权、商标权、图案设计专利权等。

③ 其他权利。

著作权

著作权保护的是关于学术、文艺、美术、音乐等各方面具有创造性的已发表作品，尚在头脑里构思着的东西不在保护之列。保护的期限以作品发表之日起到作者死后50年为止。

著作权法所规定的著作权可大致分为以下三种：

作者的名誉权

• **作者的名誉权** 作者有权决定是否发表尚未发表过的作品和维护自己的名誉，它包括三个方面，即发表权、署名权、同一性保护权。这些权利是不能转让的。

著作财产权

• **著作财产权** 作者已署名的作品，他人无权擅自复制或广播，但复制权和广播权可以转让。

著作邻接权

• **著作邻接权** 如果是著作权保护期限已过的作品，自己制作的MIDI和自己演奏的MP3等可以在网站上自由发布，但随便发布别人演奏的东西是违法的。这方面的依据就是著作邻接权。

此外，软件(程序)在1985年以后已作为作品而成为保护对象，除了用户自己使用和必要的备份以外，如果擅自对软件进行复制，著作权持有者是会追究损失赔偿责任的。每

个软件的使用范围都要遵守用户在购买软件时与软件公司所签订的使用合同，这是个基本原则。

修正过的著作权法于1997年6月正式通过，1998年1月开始执行。在修正过的著作权法中，“公众发布权”作为一种著作财产权得到了承认，“准许发布权”作为一种著作邻接权得到了承认。按照这两个发布权的规定，对于擅自通过互联网Web站点下载音乐CD数据的行为，可以作为侵害著作权来起诉。

工业所有权

工业所有权是个总称，它保护的是与产业有关的发明和方案等知识产权，既包括技术发明也包括方案设计。它就是通常所说的发明专利权、实用新型专利权、图案设计专利权、商标权等。这些权利需要经过申请和批准才能产生效力，有效期限从申请之日起为20年。

自己的权利不允许他人侵犯，自己也不能侵犯他人的权利，这是人们应该具有的原则和态度。下面这几条应该牢记在心。

① 不可擅自使用和复制别人书中的内容。

② 即使是任何人都可自由使用的免费软件，也不可随便改动。

③ 不可随便使用互联网上正在使用着的图像和照片。

④ 严禁复制别人购买的软件，也不能随便复制自己购买的软件，只有备份软件能够得到认可。

相关知识

◆ 个人隐私的保护

只要不妨碍别人，每个人都有权自由决定自己的行为。信息化社会给人们带来了许多方便，而一些没有道德的人却利用这种方便来窃取别人的私人信息，侵犯别人的隐私权。他们用窃取的私人信息乱搞恶作剧，陷他人于困境，使不少人因此而遭受精神和肉体痛苦。

鉴于这种情况，日本于2003年制定了个人信息保护法(privacy protection law)，以正确受理个人信息为原则，对国家、地方自治体及个人信息受理单位应承担的责任和义务进行了规定。该法律已于2005年4月开始执行。

尽管如此，由于网络环境下的个人信息很容易被窃取，再加上不法之徒设置陷阱和诱惑的情况又多，因而，个人具备进行自我保护的意识就显得尤其重要。如何在那些令人垂涎的诱惑面前独善其身，就要看自己如何对自己负责了。特别是对于那些骗人的甜言蜜语，千万要提高警惕，小心落到"肥肉下面的陷阱"里。

◆ 信息化社会的秩序和对策

利用互联网能轻而易举地获得大量信息，而其结果，也就把自己的个人信息告知了许多非特定的人；过多的信息交换，一方面会造成信息泛滥，另一方面一不小心还可能造成巨大损失；人们可以方便地在自己的终端设备上与互联网的那一头联系工作和交换信息，然而却看不见对方的面目，这种不透明性使人们在面对互联网售物等极为方便的事情时望而却步；因为相互通信几乎全都是用文字表达的，稍有不慎，往往会留下误解和纷争的口实。为了不伤害对方，审慎择言非常重要，收、发信息时必须考虑到因此而带来的风险和自身应该承担的社会责任及法律责任。今后，信息技术的机构还将保持下去，并且将继续影响人们的思维方式和行为，因此，必须要建立一个最低限度的秩序，才能保持良好的互联网环境。

然而，现在的实际情况却是很不乐观，愚昧无知不讲道德者大有人在，交易不讲信用者并不鲜见，窃取他人信息的事件屡屡发生，就连个人财产也笼罩在危机之中。下面，针对信息化社会，列记一些事列和对策以供参考。

① 不要让个人信息流入告示牌、征询栏及 Web 网页。

② 有些不法之徒会使用实在的金融机构等名称来套取 ID 和口令，所以管理一定要严格。

③ 有的人并没有商品，却在搞拍卖，这是欺诈行为，购物时一定要注意。

④ 不要点击不记得的邮件和有疑问的 URL。曾经有过只点击了一下邮件或 Web 的 URL，就收到了高额账单的例子。

⑤ 不要轻易上免费、贱卖之类的当，不要参与有奖征集活动。上了这类诱惑的当，信用卡信息、ID、口令就会被套走，就有可能收到高额账单或者并未购买的物品和账单。

16 IP电话

要 点

IP电话(Internet Protocol Telephone)是一种利用互联网协议技术来实现的电话业务,它与人们常说的互联网电话的机构是不同的。

解 释

互联网电话与IP电话

互联网电话是利用互联网网络来进行的电话业务。通话的时候双方需要通过启动计算机和互联网电话专用软件来连接互联网。

IP电话完全不需要通过计算机来相互连接互联网和启动特别的软件,只需像普通电话那样拨通对方的电话号码就行了。IP电话通过采用独立的IP网提高了音质,电话费也比普通电话低,在日本国内,无论向任何地方打电话,电话费都是每3分钟7.5～8日元。往国外打电话也很便宜。如果双方用的是同一系列的IP电话,那就完全不花电话费。图6.20所示为IP电话的概貌。

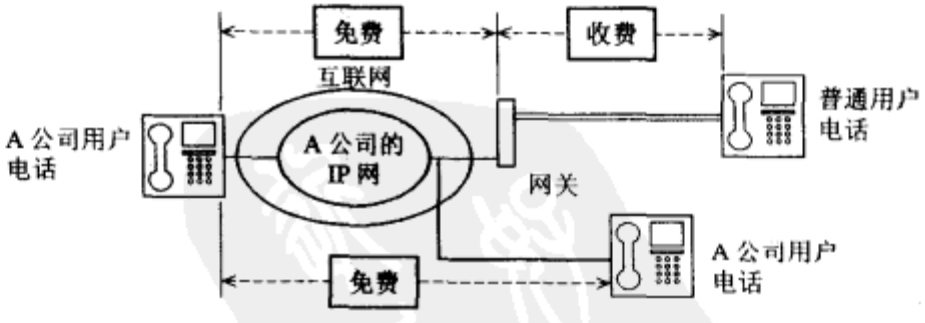


图6.20 IP电话概貌

IP网

IP网是各IP电话公司为了提高电话音质而设置的网络,它促进了光缆传输电话的发展,也可以说IP电话的普及是由光纤宽带网的普及促成的,当然,还有ADSL、CATV及光通信技术进步的贡献。

相关知识

◆ **VoIP(Voice Over IP)**

电话的声音信号本来是模拟信号，这种模拟信号是经过数字化后变成声音数据才送到IP网上的。接收端要把接收到的声音数据从数字信号变回模拟信号，才能变为可以听见的声音。IP电话迅速普及的另一个因素是因为开发出了VoIP技术。VoIP技术是一种利用宽带通信线路交换IP化声音信号的技术，它就是能够对声音信号进行模拟⇔数字双向变换的VoIP适配器。如果不用这个适配器的话，就要用软件来进行与其相同的处理。

闲 外 话

信息技术的成熟将带来什么

信息技术的成熟使得这一领域里的技术所产生的影响已经逐渐真正地融入到实际生活当中了。

从60年前所开发的晶体管，到后来的IC、LSI、超LSI，再到现在由这些LSI构成的信息处理系统，它们都给人类的生活带来了很大影响。换句话说，正是各个时期的这些技术所作出的重要贡献的积累，才使得所有的装置系统实现了智能化。各种各样的机器全都装上LSI，有了非常高级的功能，并且到了这样的装置在生活中都能买到的时代。

装置的智能化肯定会使今后的生活方式进一步发生变化。一种技术一旦成熟，其他新技术的产生就更难了。然而，正因为山路艰险，所以人们才会萌发另辟蹊径的攻坚思想。决心去干别人没有干过的事是一种挑战精神，对于科技工作者来说，这种挑战精神是最基本的。

第 7 章

电子控制

● 责任编委
小市直人
● 执　　笔
小市直人(12～17)
新井义博(1～11)
加藤清志(18～21)

所谓控制，就是让某个物体或某个机构的运动状态按照某种顺序或某种时间规律进行 变化的操作过程。如果操作过程是由人来掌握的，称为手动控制；如果操作过程不需要人干预，而是由机器自动执行的，称为自动控制。在自动执行操作过程的机器是电子设备的情况下，也称其为电子控制。

自动控制按其方式可分为顺序控制和反馈控制两大类。顺序控制的操作过程是按照预先确定好的动作顺序来进行的；反馈控制中没有这样的固定动作顺序，它是一种通过边测量控制结果边修正控制动作的方式，并把控制结果保持在目标值上。本章将对这两类控制方式的有关内容进行详细介绍。

计算机早就在控制系统中得到了广泛应用，并且在许多高级控制领域里发挥着巨大作用。本章在介绍计算机控制技术方面的最基本内容之后，还将对机器人控制这个计算机控制技术的重要应用进行简单介绍。

1　顺序控制

要　点

控制(control)的方式很多，其中有一类叫做顺序控制(sequential control)。日本工业标准(JIS)中对顺序控制的解释是“将控制过程分为若干阶段并按照预先确定的顺序来执行的控制”。也就是说，顺序控制的动作是预先设计好的，控制的步骤是固定不变的，一个动作结束之后(或者经过一定的时间后)就转而执行下一个动作，直到所有动作执行完为止。

解　释

顺序控制实例

机械的自动运转是典型的顺序控制。下面以家用洗衣机为例来对顺序控制的情形加以说明。洗衣机的动作可归纳为如下的步骤(顺序)：

① 开始。
② 放入衣物和洗涤剂。
③ 注水(需要设定水位高度)。
④ 洗涤(需要设定洗涤时间)。
⑤ 排水。
⑥ 再注水(需要设定水位高度)。
⑦ 漂洗(需要设定漂洗时间)。
⑧ 排水。
⑨ 甩干(需要设定甩干时间)。
⑩ 结束。

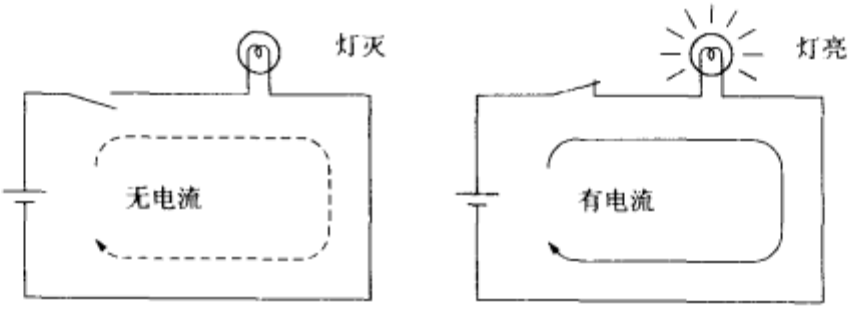
如果上述作业过程是自动进行的，它就是自动洗衣机。依据上述洗衣服的步骤，自动洗衣机的控制需要用到下述的部件或装置。

注水和排水需要用到打开和关闭注水口及排水口的自动开闭装置；洗涤和漂洗需要使用大功率电动机来转动洗衣波轮；检测水位高、低需要用到浮子式开关；设定洗涤时间、漂洗时间和甩干时间需要用到定时器。将这些部件的功能按照上述洗衣步骤的需要组合成相应的动作顺序，便可实现

自动洗衣机的顺序控制。

顺序控制方式一般适合于动作顺序比较分明的工作对象，如洗衣机、机床、电梯等。

顺序控制方式中，动作的控制是由开关、继电器、定时器等二位式器件来实现的，其中，继电器的二值逻辑规定为：有触点继电器的触点闭合状态为1，断开状态为0；无触点继电器的高电平为1，低电平为0。图7.1所示为二值逻辑的示例。



(a) [0]　　(b) [1]

	指示灯	触点	电平
0	灭	开	低
1	亮	闭	高

图7.1　二值逻辑

顺序控制设备的组成

顺序控制设备由以下各部分组成：

运转指令部分　它是把人所发出的指令传给控制部分的装置，主要是开关器件。

控制部分　它是进行二值逻辑控制的部分。

操作部分　它也称为驱动部分，主要是电动机。

检测部分　它就是一些传感器，如限位开关等。

监视部分　它是让人能看到控制状态的装置，如指示灯等。

2　控制中所用开关器件的工作原理

要　点

在顺序控制系统中，控制动作的启动和停止是由开关器件来实现的。按钮开关和微动开关是具有代表性的开关器件。按钮开关只有在按钮被按下去时才有开关作用，手一松开，它就又回到了原来的状态。微动开关是通过接触物体来感知物体位置的开关器件。

解　释

开关的功能

按钮开关(PBS)里通常装有弹簧，当按在它上面的手松开时，它能自动地恢复到原来的状态。

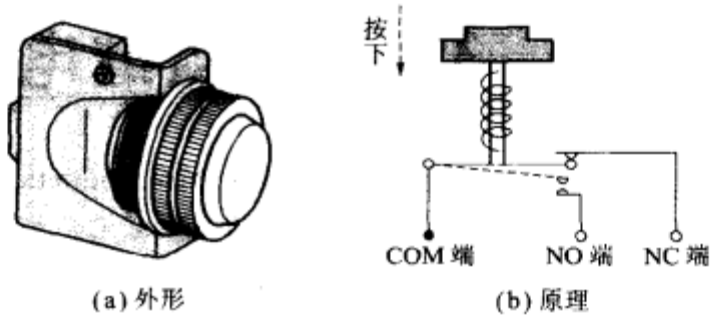
按钮开关有三个端子，COM 端是公共端(common)，NO 端是常开触点(normally open contact)，NC 端是常闭触点(normally close contact)。利用这三个端子能实现两种动作，一种是“按下按钮时外部电路接通，松开按钮时外部电路断开”，另一种是“按下按钮时外部电路断开，松开按钮时外部电路接通”。

在按下按钮使外部电路接通的情况下，采用的是 COM 端和 NO 端；在按下按钮使外部电路断开的情况下，采用的是 COM 端和 NC 端。

采用 COM 端和 NO 端构成的触点方式称为接通型触点(把常开触点接通，也称为 a 型触点)；采用 COM 端和 NC 端构成的触点方式称为断开型触点(把常闭触点断开，也称为 b 型触点)。

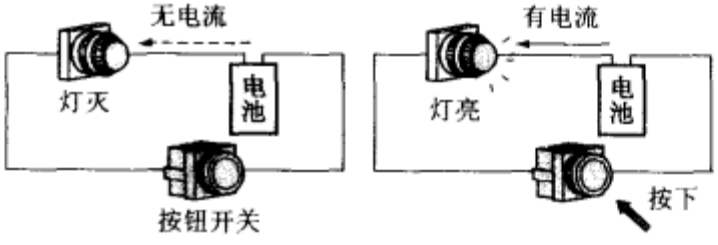
此外，还有一种方式，称之为切换型触点，也称为 c 型触点。这种触点方式是 a 型和 b 型的结合，它由 COM 端、NO 端和 NC 端共同构成，未按按钮时 COM 端与 NC 端是接通的，按下按钮时就变为 COM 端与 NO 端接通。

图 7.2 所示为按钮开关的外形和原理，图 7.3 示出了接通型触点、断开型触点和切换型触点的示例及其图示符号。

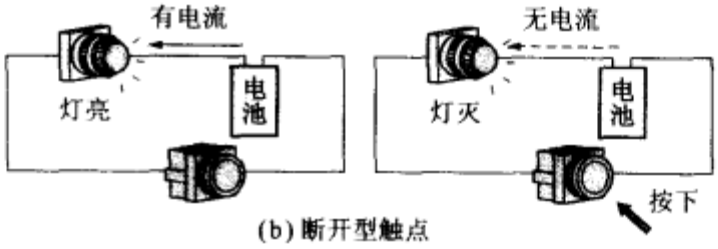


(a) 外形　　(b) 原理

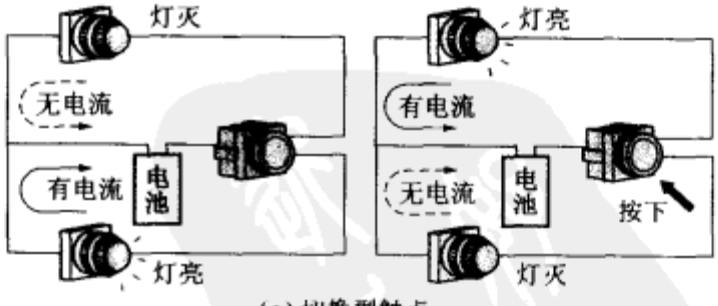
图 7.2　按钮开关



(a) 接通型触点



(b) 断开型触点



(c) 切换型触点



(d) 图示符号

图 7.3　接通型、断开型及切换型触点

3　有触点继电器

要　点

电磁继电器(electronmagnetic relay)是典型的有触点继电器，这种继电器的触点是利用电流流过线圈时所产生的电磁力来开、闭的。它是顺序控制中不可缺少的开关器件。

解　释

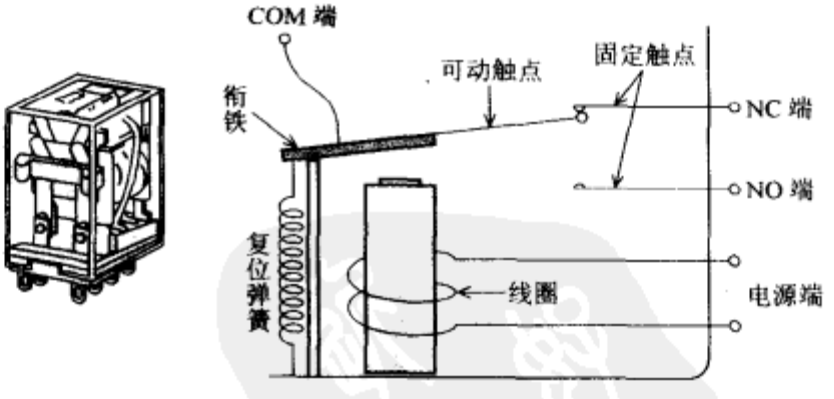
电磁继电器的启动与复位

当电磁继电器线圈中有电流流过时，衔铁被吸动，安装在衔铁上的可动触点便脱离常闭触点(NC 端)而与常开触点(NO 端)相接触，这一过程称为电磁继电器的**启动**，继电器启动的结果是把 NC 端所连接的外电路断开和把 NO 端所连接的外电路接通。当线圈中的电流消失时，复位弹簧就把衔铁拉回到原来的位置，这一过程称为电磁继电器的**复位**。图 7.4 是**电磁继电器**的外形和构造示意，图 7.5 是电磁继电器的图示符号。

启动

复位

电磁继电器



(a) 外形　　(b) 原理

图 7.4　电磁继电器的构造



横画　纵画　横画　纵画

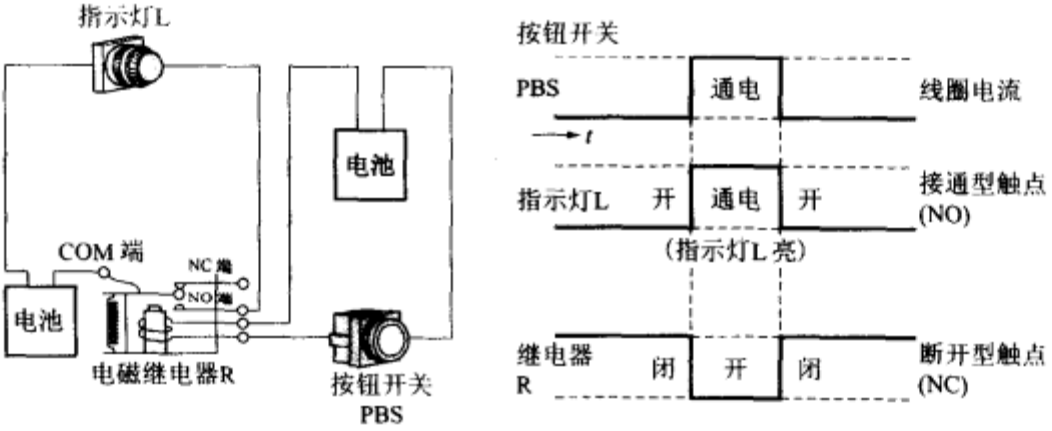
(a) 接通型触点　　(b) 断开型触点

图 7.5　电磁继电器的图示符号

电磁继电器一般有1～8组由COM端、NO端和NC端构成的触点，它能同时控制多个电路。

电磁继电器接通型触点的动作原理

如图7.6所示，电磁继电器接通型触点的动作原理是，当按钮开关PBS被按下时，电磁继电器的线圈中就有电流流过，继电器就变成了电磁铁，可动触点就把NO端接通，外部电路中就有电流流过，指示灯L被点亮。



(a) 接通型触点　　(b) 动作原理

图7.6　电磁继电器接通型触点的动作原理

相关知识

◆ 时序图

时序图是一种以时间为横轴所画出的各个机器动作之间关系的图。前面所述的电磁继电器动作的时序图如图7.7所示。

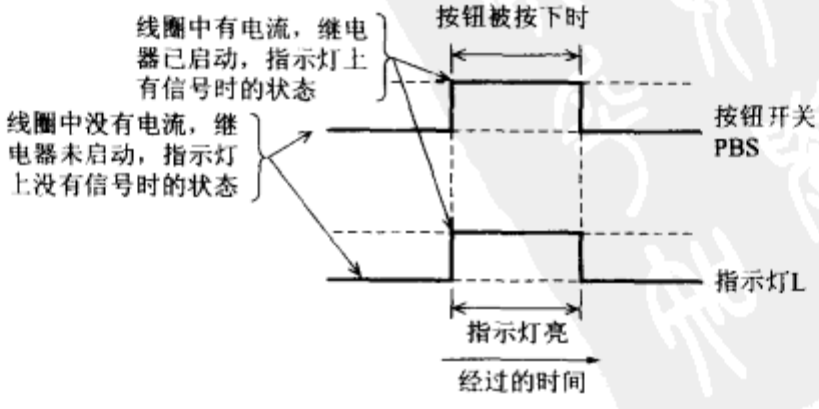


图7.7　时序图

4　无触点继电器

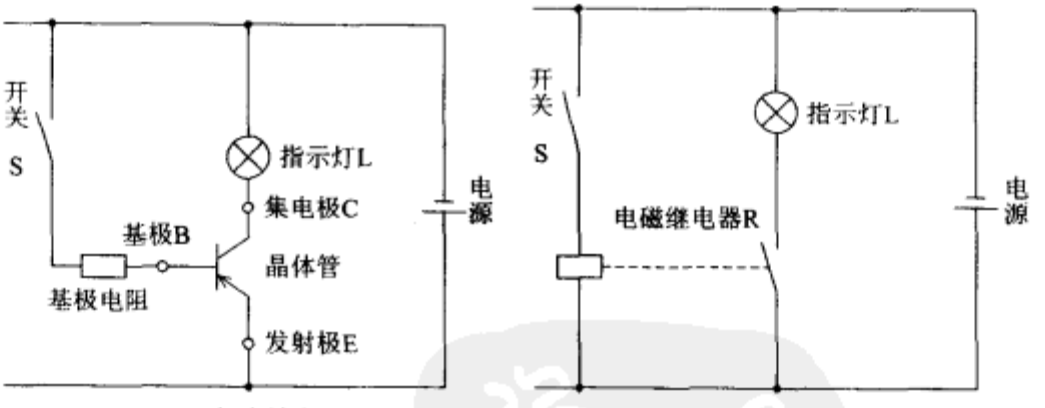
要　点

与具有机械式可动触点的电磁继电器不同，由晶体三极管或二极管等半导体器件所构成的继电器是无触点继电器。无触点继电器的“触点”的“开”和“闭”是用电压的高和低来表示的，电压高时表示成 1，电压低时表示成 0。用无触点继电器所构成的电路称为无触点电路。

解　释

无触点继电器

图 7.8(a)是一个无触点继电器电路，当开关 S 闭合时，晶体管的基极就有了电流，集电极中就有电流流过，指示灯 L 便被点亮。图 7.8(b)是采用电磁继电器实现同一动作的电路。



(a) 无触电继电器　　(b) 有触电继电器

图 7.8　无触点继电器与有触点继电器

无触点继电器具有动作速度快、寿命长、耐机械振动和耐冲击能力强、耗电少、装置易于小型化等优点，其缺点是易于受浪涌电流和噪声及温度变化的影响。

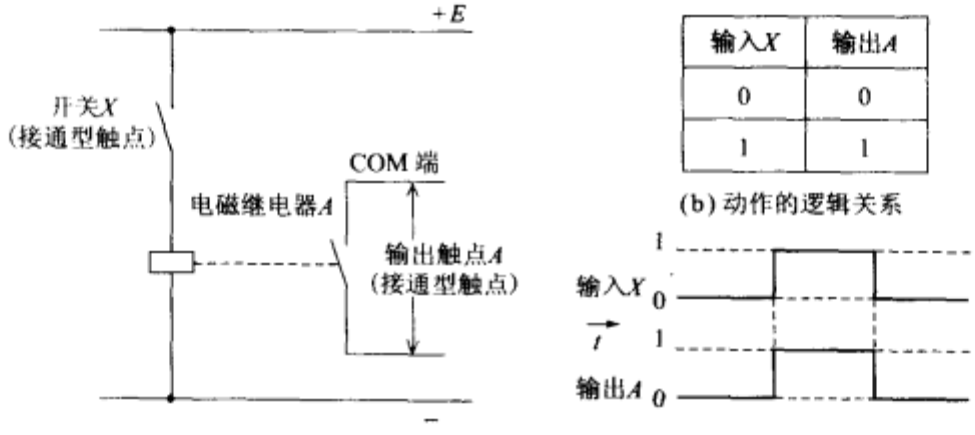
无触点继电器中没有电流流过的状态与有触点继电器的断开状态相当，其逻辑电平取为 0；有电流流过时的状态与有触点继电器的接通状态相当，其逻辑电平取为 1。

相关知识

◆ 继电器电路与逻辑代数

如图 7.9 所示，设开关 X 为输入触点，电磁继电器 A 为输出触点，若输入 X 为 0(即开关 X 没有合上)，则输出 A 为 0(输出电路中没有电流)。若输入 X 为 1(即开关 X 已合上)，则输出 A 为 1。

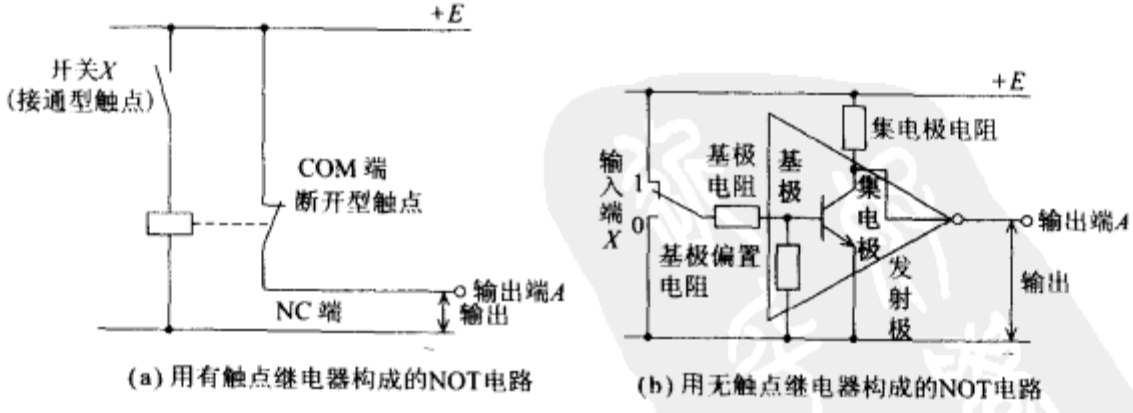
图 7.10 至图 7.12 示出了一些用有触点继电器和无触点继电器构成的逻辑电路示例。



输入X	输出A
0	0
1	1

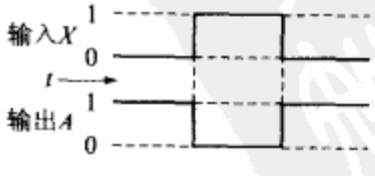
(a) 实际连线图　(b) 动作的逻辑关系　(c) 时序图

图 7.9　逻辑代数



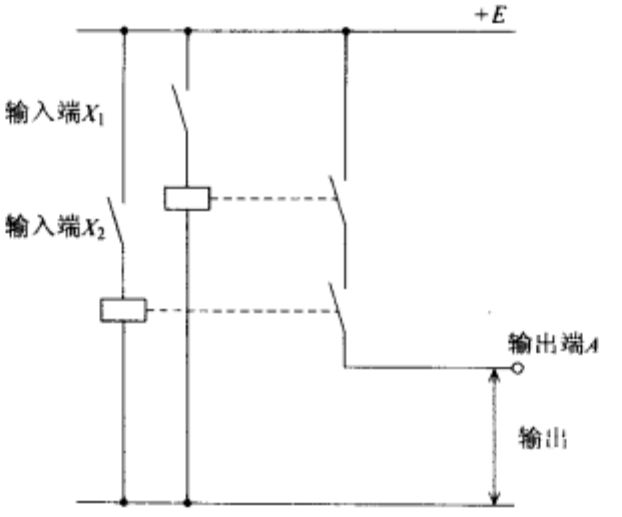
(a) 用有触点继电器构成的NOT电路　(b) 用无触点继电器构成的NOT电路

输入X	输出A
0	1
1	0

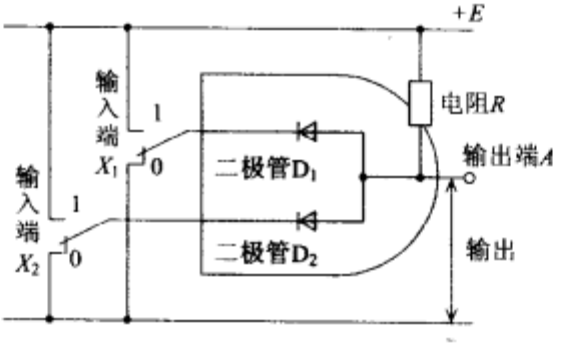


(c) 动作逻辑关系　(d) 时序图

图 7.10　用有触点继电器和无触点继电路构成的电路示例(一)



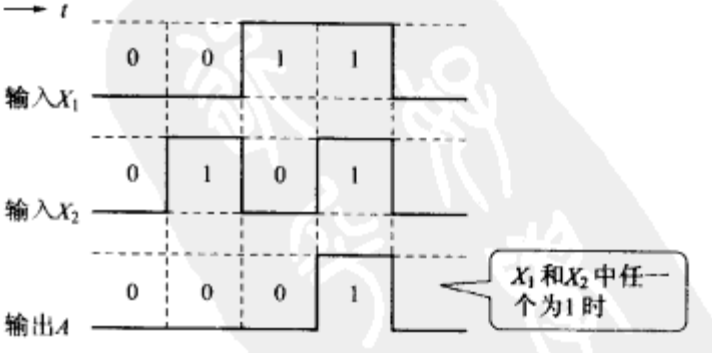
(a) 用有触点继电器构成的AND电路



(b) 用无触点继电器构成的AND电路

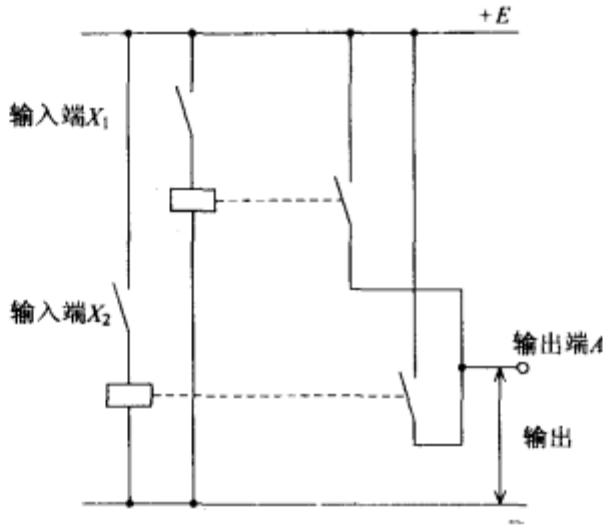
输入		输出
X_1	X_2	A
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(c) 动作逻辑关系

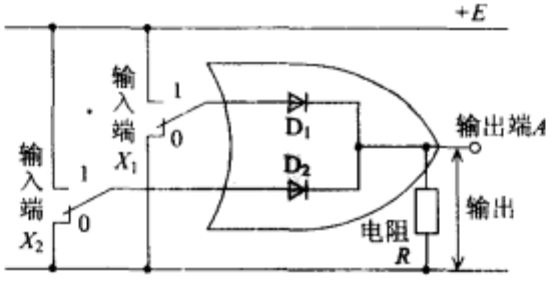


(d) 时序图

图 7.11　用有触点继电器和无触点继电器构成的逻辑电路(二)



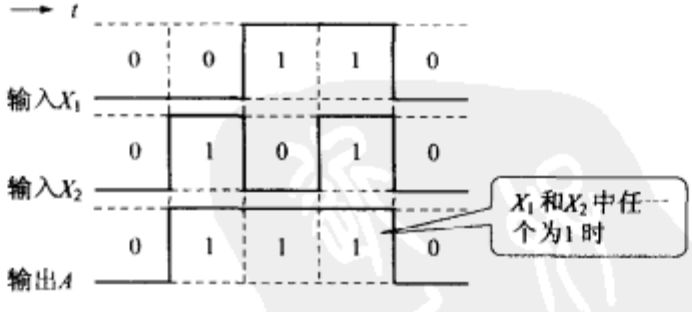
(a) 用有触点继电器构成的OR电路



(b) 用无触点继电器构成的OR电路

输入		输出
X_1	X_2	A
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(c) 动作逻辑关系表



(d) 时序图

图 7.12　用有触点继电器和无触点继电器构成的逻辑电路(三)

5　顺序图

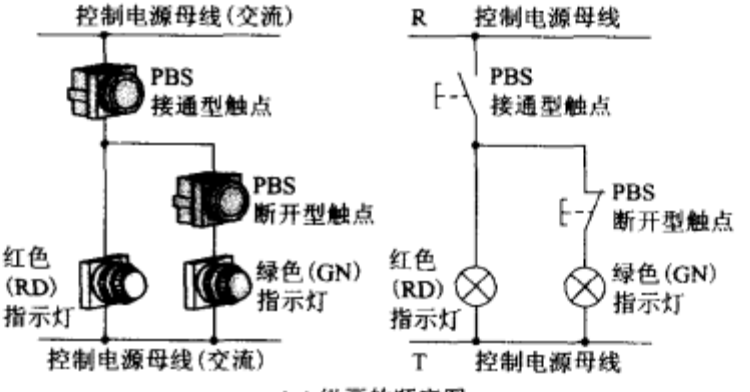
要　点

顺序图是为了使复杂控制电路变得易于理解而画成的电路连接图。顺序图有两种画法，电源线画在上、下方的称为纵画顺序图，电源线画在左、右侧的称为横画顺序图。

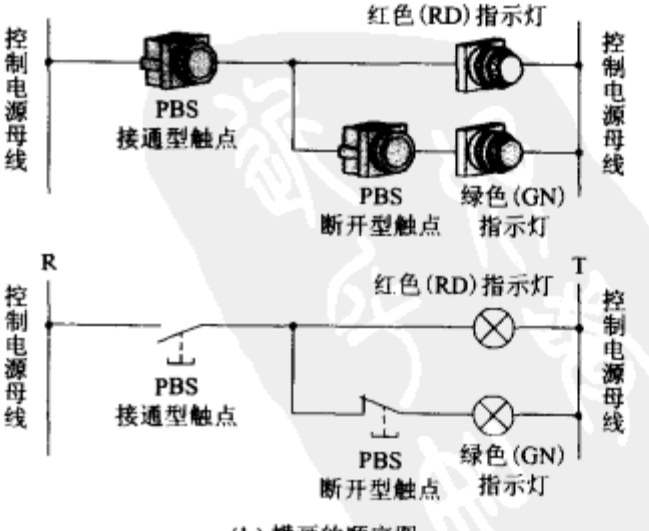
这里的电源线称为控制电源母线，当控制电源采用交流电时，两根电源线分别用R和T来标记(见图7.13)；当控制电源采用直流电时，两根电源线分别用P和N来标记(见图7.14)。

解　释

顺序图中的图示符号都是按照所有机器和电路处于休



(a) 纵画的顺序图



(b) 横画的顺序图

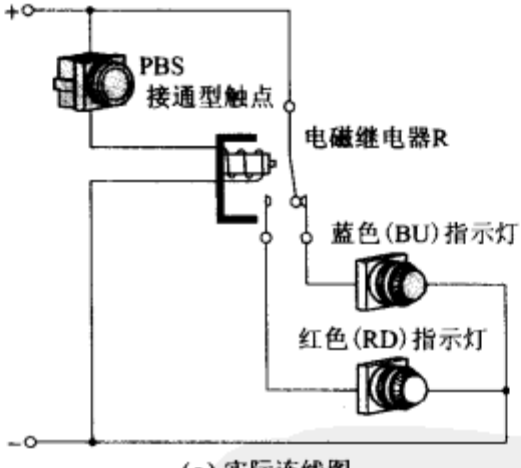
图7.13　用按钮开关构成的顺序图

止状态(没有电流流动)时的情形画出的。

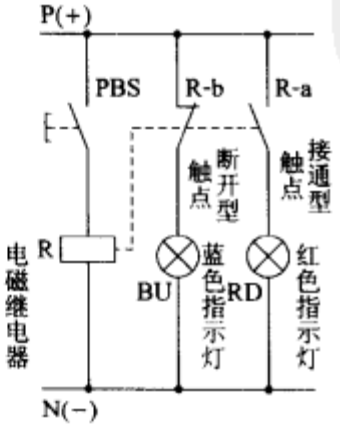
图 7.13 是个交流控制电源母线控制着按钮开关(接通型触点和断开型触点)、红色(RD)指示灯和绿色(GN)指示灯的顺序图。图中所画的各设备状态均为休止状态,即① 按钮开关等手动操作设备为手未按上去时的状态;② 电磁继电器等设备为一切电源均被切断情况下的状态;③ 需要复位的设备为已复位状态。

纵画顺序图的情况下,控制线按照动作的顺序从左向右排列;横画顺序图的情况下,控制线按照动作的顺序从上向下排列。

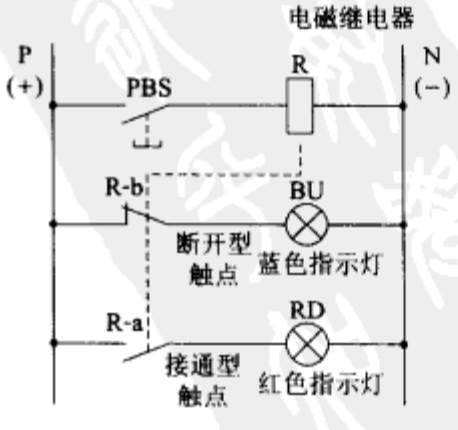
在顺序图上表示电磁继电器等设备时的图示符号,即使是按照接有电源的情形来画的,它所表示的也是电源实际上被切断时的状态。



(a) 实际连线图



(b) 纵画的顺序图



(c) 横画的顺序图

图 7.14 用电磁继电器构成的顺序图

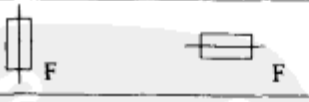
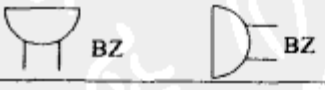
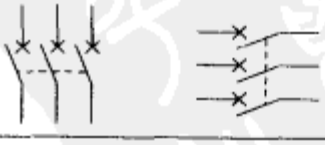
图 7.14 所示是控制电源母线为直流电的顺序图，当开关 PBS 被按下时，红色指示灯被点亮；当手松开时，蓝色指示灯被点亮。

在顺序图中，电磁继电器由电磁线圈和触点两部分来表示。电磁线圈部分要标上 R、X、MC 等符号；触点部分的标注符号是由电磁线圈符号和用连字符连接在它后面的接通型触点（a 型触点）或断开型触点（b 型触点）组合而成的符号，如 R－a、X－b、MC－a 等。此外，电磁线圈部分与触点部分的关系要用虚线标出，如图中的 R、R－b、R－a 就是由虚线标明它们是一起动作的。

相关知识

除了上面所述的符号以外，顺序图中还会用到表 7.1 所示的图示符号。

表 7.1　图示符号

种　类	顺序图符号
闸刀式开关	
电动机	
熔丝	
电铃	
蜂鸣器	
配线用的断路器	
电磁接触器	

6　各种传感器式开关器件

要　点

为了对控制动作进行检测，顺序控制系统中采用了各种各样的传感器，其中，既有像限位开关那样利用机械式接触来进行检测的，也有利用光、磁、超声波等来进行非接触式检测的。

解　释

限位开关

限位开关是一种利用机械式接触来检测控制动作的传感器，根据应用场合的不同，限位开关上的传感臂的形状也有所不同(见图 7.15)。

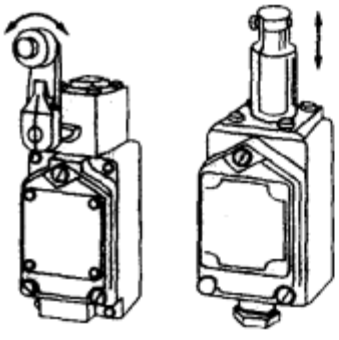


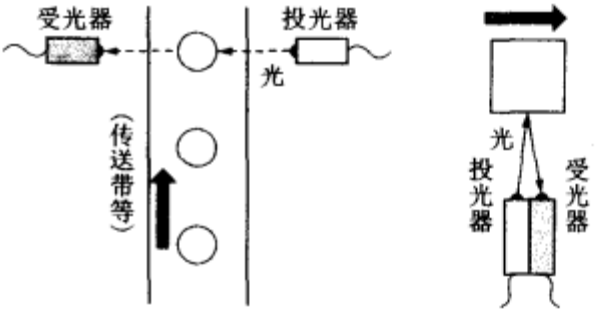
图 7.15　限位开关

一般情况下，限位开关上都备有接通型触点和断开型触点。

光电开关

光电开关是利用光线来检测固体、液体、气体等的位置参数或移动情形的非接触式传感器，它由投光器和受光器两部分构成。投光器的光源可采用白炽灯泡、红外线 LED 等；受光器可采用 CdS 和光电二极管等受到光照便能发出检测信号的材料或器件。按照配置方式的不同，光电开关可分为透射式和反射式两类。使用当中，透射式光电开关的投光器和受光器分别配置在被测物体的两侧，当物体从它们的中间走过时，投光器发射的光线被遮挡，受光器便发出检测信号。反射式光电开关的投光器和受光器装配在同

一个壳体内，它是通过检测从物体上反射回来的光线来获取物体的位置信息的。图 7.16 示出了光电开关的配置。



(a) 透射式　　(b) 反射式

图 7.16　光电开头的配置

感应式开关

感应式开关是一种当它与被测物体之间的距离接近到一定程度时便能发出检测信号的传感器式开关，其类型很多，有高频振荡型、感应电桥型（差动变压器）、磁铁型（舌簧管）及电容型等。

高频振荡型

• **高频振荡型**　它是利用金属物体接近高频振荡电路的线圈时，线圈阻抗变化而使电路停止振荡的原理而制成的。

感应电桥型
差动变压器

• **感应电桥型（差动变压器）**　它是利用金属物体接近桥臂时，电感电桥因桥臂阻抗变化而失去平衡的原理制成的。

磁铁型
舌簧管

• **磁铁型（舌簧管）**　它是在被测物体上安装一个磁铁，利用磁铁的吸引力来驱动开关的。

电容型

• **电容型**　它是利用物质进入电容器极板之间时，介电系数的变化导致电容量变化的原理制成的。这种传感器或开关适合于检测液面高度。

超声波开关

超声波开关由超声波发生器和超声波接收器构成，常用于检测物体的位置。自动门等场所就用得很多，它也适合于检测粉末状物质。

温控开关

温控开关常用于需要把温度保持在一定值上的装置中。当温度偏离设定值时，开关产生动作，接通或关断加热装置，使温度回到设定值上。温控开关常采用热敏电阻或热电偶来制作，200℃以下多采用热敏电阻，200℃以上多采用热电偶。

压控开关

压控开关有机械式和半导体式两种方式。机械式压控开关是利用感压膜片来检测压力变化的，它能把膜片的位移变成微动开关的通断；半导体式压控开关是利用半导体压力传感器来检测压力变化的，它能把压力的变化变换成二值电压信号。由于半导体式压控开关是采用无触点方式，因而它在寿命、可靠性、小型化等方面都优于机械式压控开关。

顺序控制器

要　点

顺序控制器也称为可编程序控制器(PC)，它是由计算机对其内部的无触点继电器、定时器、计数器进行控制，从而使顺序电路工作的控制设备。

解　释

顺序控制器

顺序控制器由存储部分、运算控制部分、输入/输出接口部分、输入部分及输出部分构成。

存储部分
运算控制部分
输入/输出接口
输入部分
输出部分

存储部分的作用是储存动作的次序(即程序)；**运算控制部分**的作用是对所存入的各种运算关系进行控制和向外部设备发出动作指令；**输入/输出接口**部分的作用是在输入/输出部分与运算控制部分之间建立联络关系；**输入部分**的作用是读入来自按钮开关和继电器触点等处的输入信号；**输出部分**的作用是向指示灯和电动机等设备发出动作信号。

顺序控制器的最大优点是能够很方便地改变一度完成了的控制顺序。如果是用电磁继电器等器件构成的顺序电路，即使是很少的控制变更，配线和电磁继电器的连接也得改变，而如果采用的是顺序控制器，那就只需改变程序部分即可。

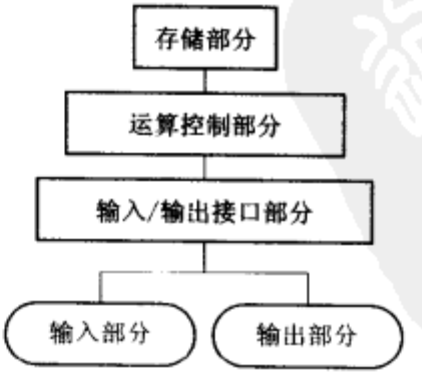


图 7.17　顺序控制器的构成

此外，由于它没有电磁继电器等可动部分，因而抗震性能好。又由于它的内部触点采用的是无触点继电器，因而没有触点磨损的问题，寿命很长。它还有一些其他优点，例如，它既有利于大规模顺序控制的小型化，又能够把动作结果等数据在内部储存起来，还可以将数据发送给外部设备等。图 7.17 示出了顺序控制器的构成。

顺序控制器的程序

梯形图

顺序控制器的程序一般是用**梯形图**绘制的，也可以利用称为编程器的输入工具，从画着梯形图表示符号的键盘输进去。梯形图的表示符号如表 7.2 所示。

表 7.2 梯形图的表示符号

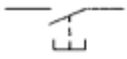
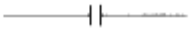
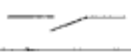
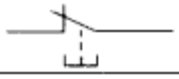
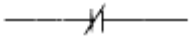
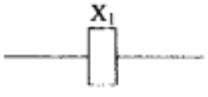
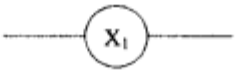
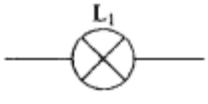
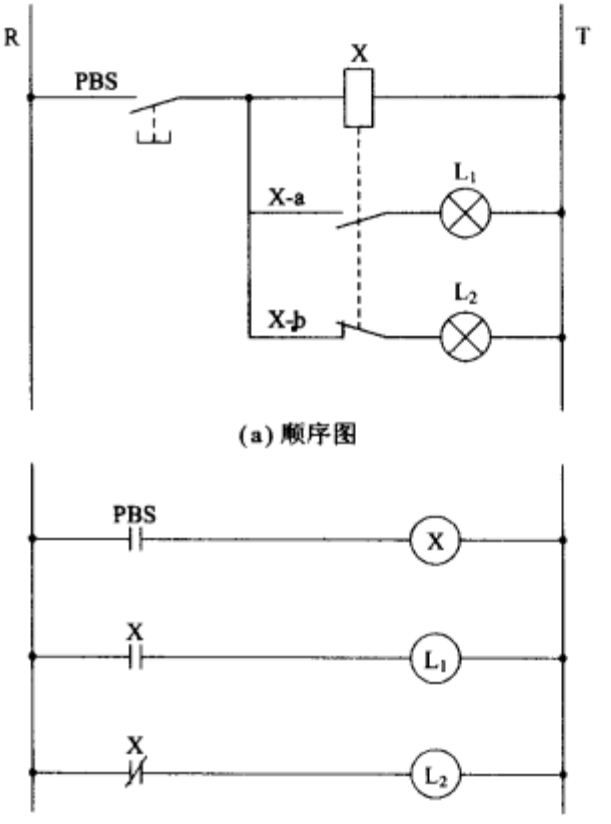
	种类	顺序图的表示符号	梯形图的表示符号
接通型触点	按钮开关		
	继电器		
断开型触点	按钮开关		
	继电器		
负荷	继电器的线圈（如 X_1）		
	指示灯（如 L_1）		

图 7.18 示出了一个简单顺序控制的顺序图和梯形图，其控制过程为：按下按钮开关 PBS，电磁继电器产生动作，指示灯 L_1 由接通型触点 X-a 点亮，指示灯 L_2 由断开型触点 X-b 熄灭。

加载
非加载
负荷

在梯形图中，接通型触点称为**加载**（LD），断开型触点称为**非加载**（LDNOT），电磁继电器的线圈和指示灯等**负荷**称为输出（OUT）。

另外，串联连接触点时，编程器上是用“与”（AND）键输入的；并联的时候是用“或”（OR）键输入的。图 7.19 示出了梯形图表示符号的用法。



(a) 顺序图

(b) 梯形图

图 7.18　顺序图与梯形图

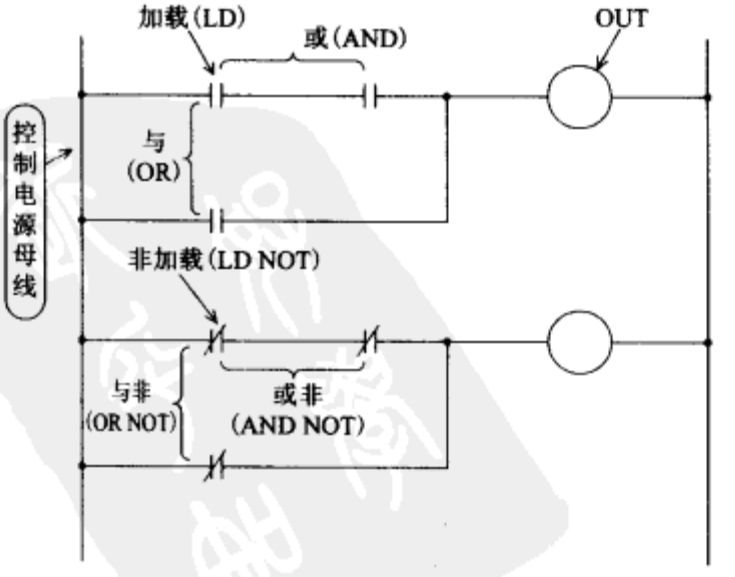


图 7.19　梯形图表示符号的用法

8　自保持电路

要　点

自保持电路是一种能够把电磁继电器所得到的输入信号由继电器自己保持住的电路，这种电路即使在输入信号被切断的情况下，切断前的状态也仍然能继续保持下去。也就是说，自保持电路具有记忆功能，它能在按钮开关只按了一下就把手松开的情况下，得到与手一直按在按钮上一样的效果。

解　释

自保持电路的工作原理

图 7.20 示出了一个自保持电路，图 7.21 是它的时间图。这个电路能在专管启动的按钮开关 PBS_1 只按一下就松开的情况下，使指示灯 L 一直亮下去，这就是自保持功能。要解除自保持状态，需要按一下专管停止的按钮开关 PBS_2。该电路的工作原理如下。

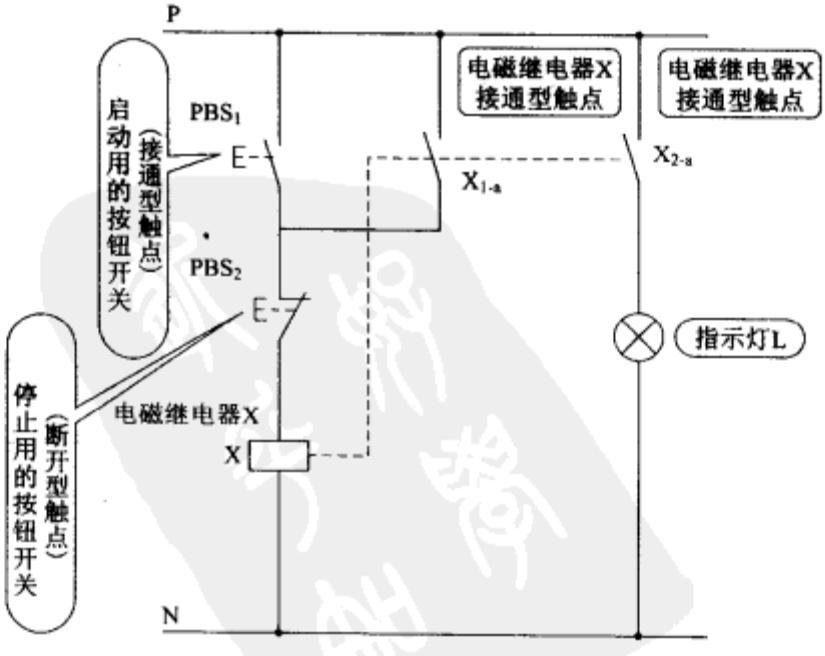


图 7.20　自保持电路

自保持功能的加入

① 按下专管启动的按钮开关 PBS_1。

② 电流流过电磁继电器 X 的线圈。

③ 电磁继电器 X 启动。

④ 触点 X_{1-a}闭合。

⑤ X 为电磁继电器 X 的线圈又提供了一条供电线路，线圈中的电流不再与按钮开关 PBS_1 的通、断有关。触点 X_{1-a}闭合的同时，触点 X_{2-a}也已闭合，指示灯 L 被点亮，并且一直保持亮着。

自保持状态的解除

① 按下专管停止的按钮开关 PBS_2。

② 断开型触点断开，电磁继电器 X 的线圈中没有电流。

③ 电磁继电器 X 复位。

④ 触点 X_{1-a}和 X_{2-a}断开，指示灯 L 熄灭。

图 7.20 的电路在 PBS_1 和 PBS_2 同时按下的情况下，电磁继电器 X 的线圈中是不会有电流的，因而电磁继电器不会启动，也就不会形成自保持状态，指示灯 L 不会点亮。这种电路称为复位优先的自保持电路。

图 7.22 所示的电路为启动优先的自保持电路，这种电路在 PBS_1 和 PBS_2 同时按下的情况下不会形成自保持状态，但指示灯 L 将被点亮。

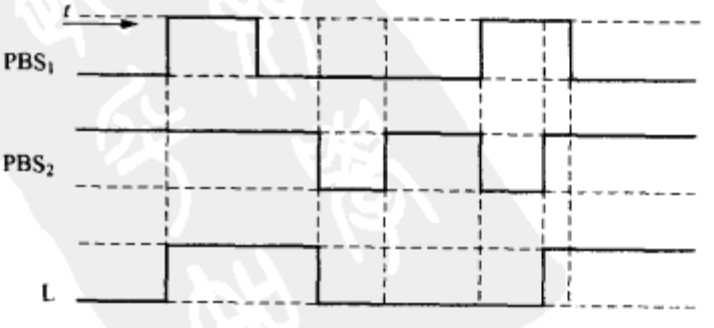


图 7.21　时序图

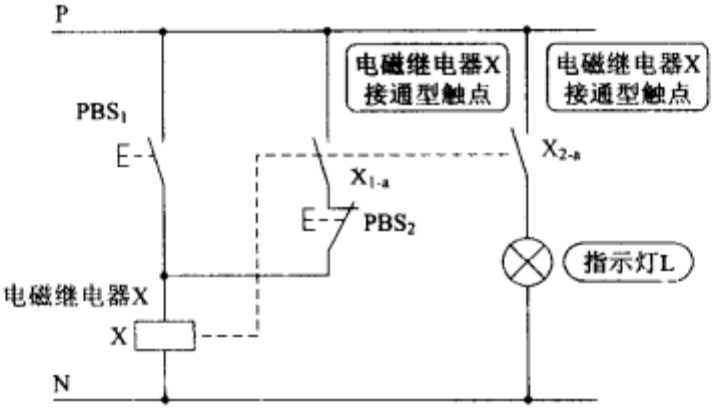


图 7.22 启动优先的自保持电路

9　联锁电路

要　点

联锁电路也称为禁止电路，它是个在某种条件未满足之前就不允许动作发生的电路，主要用于设备的保护、操作员的安全及保证动作的优先度。

解　释

联锁电路

图 7.23 中，当按钮开关 PBS_1 按下时，电磁继电器 X_1 开始工作，$X_{1\text{-}a}$闭合，指示灯 L_1 被点亮。在这一状态下，即使 PBS_2 被按下，也因为 $X_{1\text{-}b}$是断开的而不会使电磁继电器 X_2 启动，所以指示灯 L_2 不会被点亮。如果断开按钮开关 PBS_1，则电磁继电器 X_1 复位，$X_{1\text{-}b}$闭合，$X_{1\text{-}a}$断开，指示灯 L_1 便熄灭。

如果按下按钮开关 PBS_2，则电磁继电器 X_2 起作用，指示灯 L_2 被点亮。这时，与按下按钮开关 PBS_1 时的情形一样，由于联锁电路的作用，指示灯 L_1 和 L_2 不会同时被点亮。图 7.24 示出了这种动作的时间图。

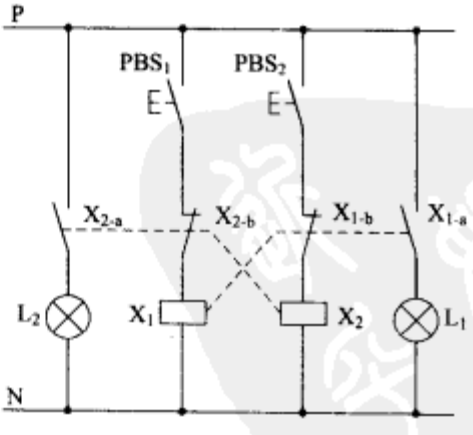


图 7.23　联锁电路

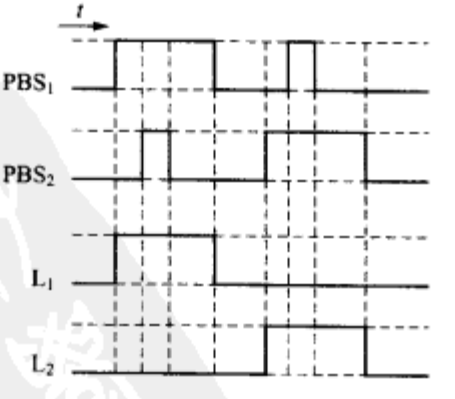


图 7.24　联锁电路的时间图

电动机正、反转控制电路示例

图 7.25 是一个电动机正、反转控制电路的例子，电动机的正、反转是由电磁接触器来控制的。

配线断路器 MCCB 是个能在电流过大或短路时把电

路切断的保护装置，与电磁继电器相比，断路器能够用于接通或断开更大的电流，其构造是主触点与辅助触点联动。

合上配线断路器开关之后，如果按下正转开关 PBS_1，则正转电磁接触器 F-MC 的主触点闭合，电动机正传。同时，辅助触点 F-MC-a 闭合，给正转开关加上了自保持功能；辅助触点 F-MC-b 断开，给反转电路加上了联锁功能。此后若按下停止按钮开关 PBS_3，两个电磁接触器就全都复位，电动机就停止转动。

如果没有联锁电路，两个电磁接触器同时动作时就会使 R 相和 T 相短路，流过的大短路电流就会造成烧损事故。

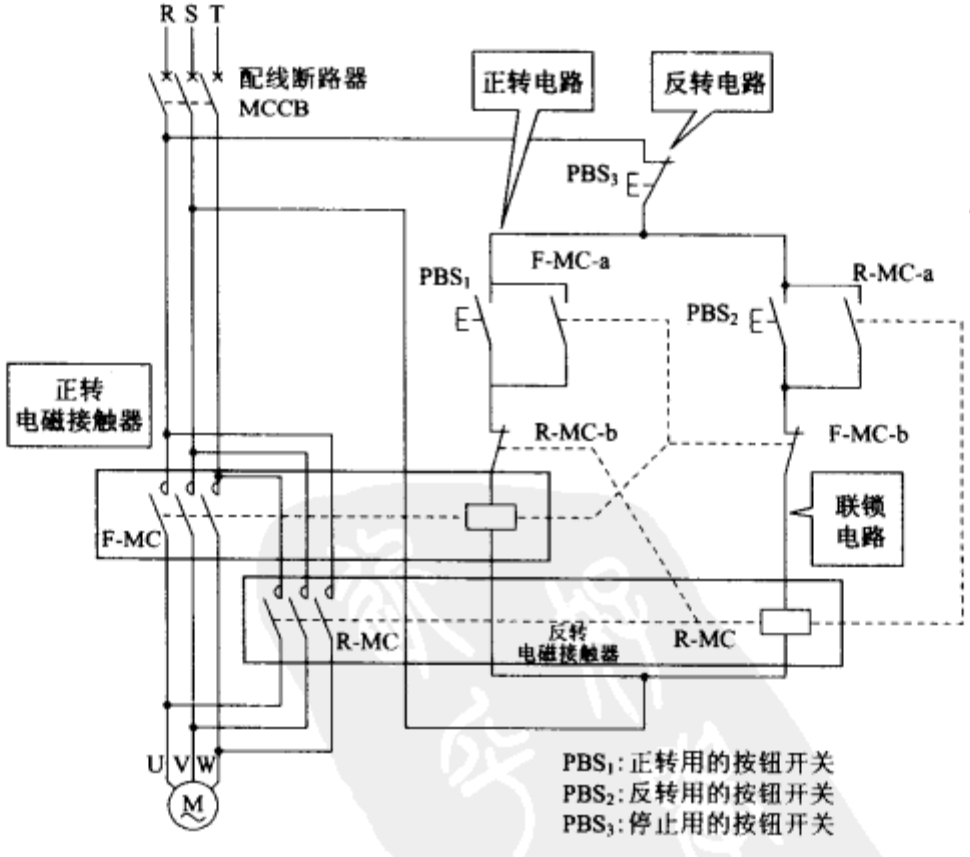


图 7.25 电动机的正、反转控制电路

热敏继电器

热敏继电器(THR)也称为热动式过电流继电器，它是能在电路异常电流过大的情况下保护电路安全的继电器。

热敏继电器的工作原理是，如果电路出现异常，过大的电流就会使电路发热，双金属片热敏传感器就会因为受热而变形，从而使断开型触点启动，电磁继电器就将异常电路切断了。热敏继电器的机构使它能够在启动之后把电路被切断的状态一直维持到进行复位为止。复位动作要在异常因素排除之后用手动操作来进行，动作开始的电流值用度码盘来设定。

10　定时器电路

要　点

定时器也称为延时继电器，它能按预先设定的时间接通或断开电路。其作用有定时启动和定时复位两种。定时启动是指从信号输入时算起，经过一定的时间后输出触点产生动作；定时复位是指从信号中断时算起，经过一定的时间后输出触点产生动作。定时启动的情况下，如果已输入的信号中断，输出端便复位；定时复位的情况下，如果再次有信号输入，输出端子也将复位。

解　释

□ 电动机式定时器

电动机式定时器一般是采用由输入信号驱动小型同步电动机转动的方法来定时的。定时时间的设定采用机械方式，设定时间一到，定时器就把触点接通或断开。

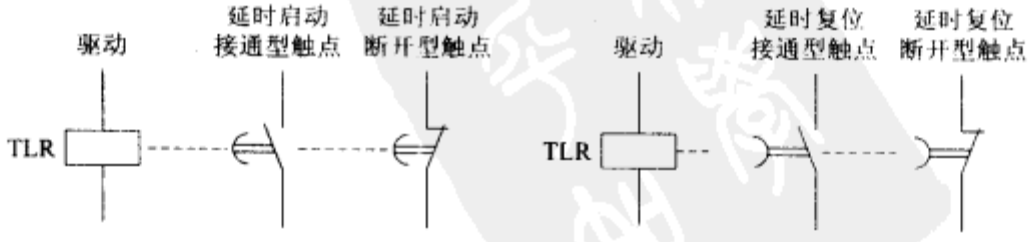
□ 电子式定时器

电子式定时器中利用的是 RC 电路充放电原理，即利用由电阻和电容组合成的电路在充、放电过程中所形成的时间延迟效果来确定触点的接通时间和断开时间。

□ 制动式定时器

制动式定时器是将空气或油之类的制动力用在电磁线圈上，使输入信号产生时间延迟，从而确定触点的接通时间和断开时间。

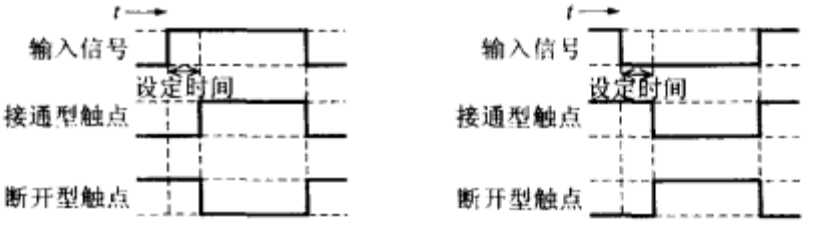
定时器的表示符号如图 7.26 所示，其中图 7.26(a)是



(a) 延时启动定时器的表示符号　　(b) 延时复位定时器的表示符号

图 7.26　定时器的表示符号

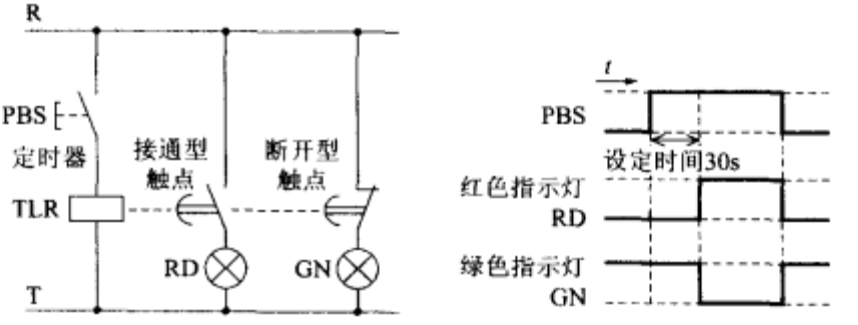
延时启动的表示符号，图 7.26(b)是延时复位的表示符号。图 7.27 是定时器的时间图。



(a) 延时启动定时器的时序图　　(b) 延时复位定时器的时序图

图 7.27　定时器的时序图

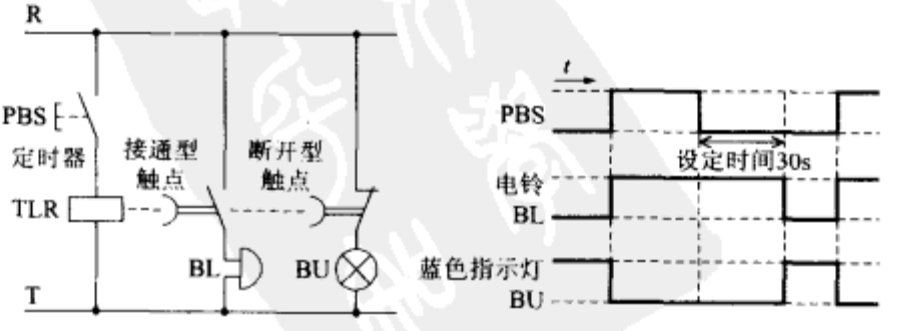
[控制示例 1]　图 7.28 是用定时器(TLR)的延时启动作用构成的指示灯驱动电路。本来是红灯不亮绿灯亮着，现在将开关 PBS 持续按下 30s，则红灯变亮绿灯熄灭。



(a) 顺序图　　(b) 时序图

图 7.28　用定时器的延时启动作用构成的指示灯驱动电路

[控制示例 2]　图 7.29 是用定时器的延时复位作用构



(a) 顺序图　　(b) 时序图

图 7.29　用定时器的延时复位作用构成的电铃和蜂鸣器驱动电路

成的电铃和蜂鸣器的驱动电路。这里以车库里不断地开出汽车的情形予以说明。出库准备工作就绪时，蓝色指示灯亮。

现在，按一下开关 PBS，则蓝色指示灯熄灭，蜂鸣器鸣叫，通知第一辆汽车出库。手离开开关 PBS 后再过 30s，蜂鸣器停止鸣叫，蓝色指示灯亮，通知下一辆汽车出库。

11　顺序控制举例

要　点

假定厨房在一层、餐厅在二层的二层楼饭馆里安装了一部运送饭菜的升降机，现在以这个升降机为例来说明顺序控制是如何进行的。

解　释

□ 饭菜运送升降机的顺序控制

图 7.30 是饭菜运送升降机的示意。为了使升降机安全运行，需要有以下的功能和措施：

① 按下开关 PBS_1 时升降机上升。

② 按下开关 PBS_2 时升降机下降。

③ 用限位开关 LS_1 检测升降机是否已到达一层。

④ 用限位开关 LS_2 检测升降机是否已到达二层。

⑤ 用指示灯 L_1 和 L_2 告知升降机是位于一层还是二层。

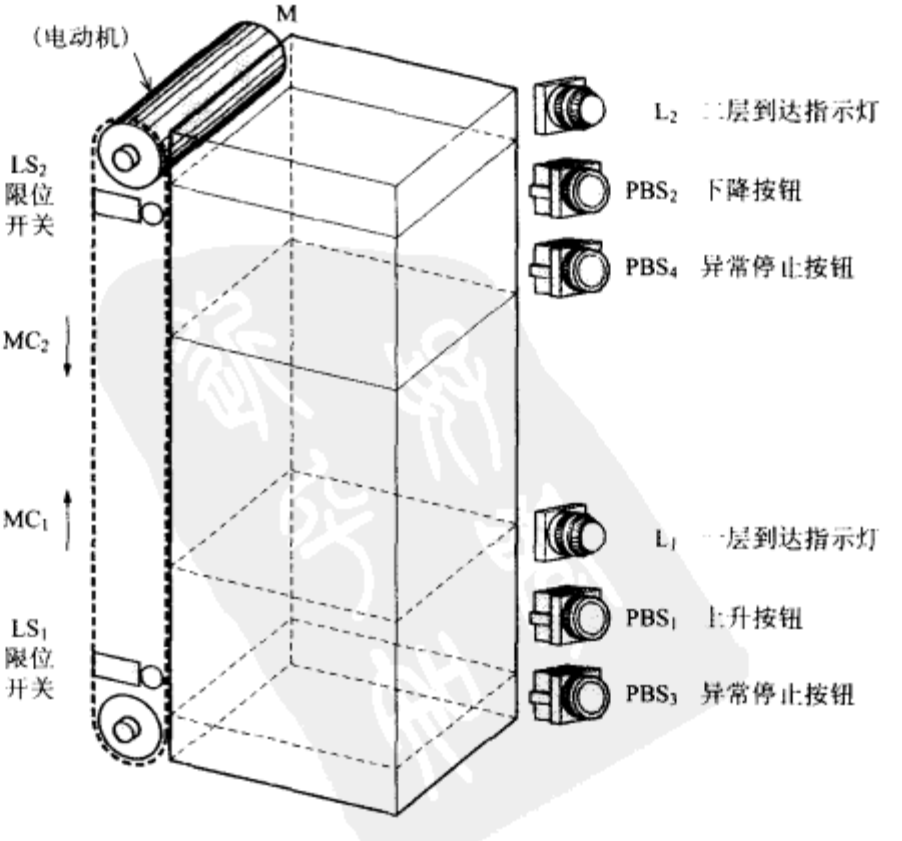


图 7.30　饭菜运送升降机

⑥ 用三相电动机 M 的正、反转使升降机上、下运动。

⑦ 用正、反转电磁接触器 MC_1 和 MC_2 来接通或断开电动机的供电电路。

⑧ 用配线断路器 MCCB 进行电动机的配线保护。

⑨ 出现异常情况时，用开关 PBS_3 或 PBS_4 使升降机停止运动。

上升开关和下降开关设有自保持电路和联锁电路，以此来保证按下开关的手离开时升降机的动作能继续进行。电动机的起动采用全电压起动法，电动机的反转采用交换 R 相和 S 相的办法来进行。图 7.31 示出了饭菜运送升降机的顺序图。

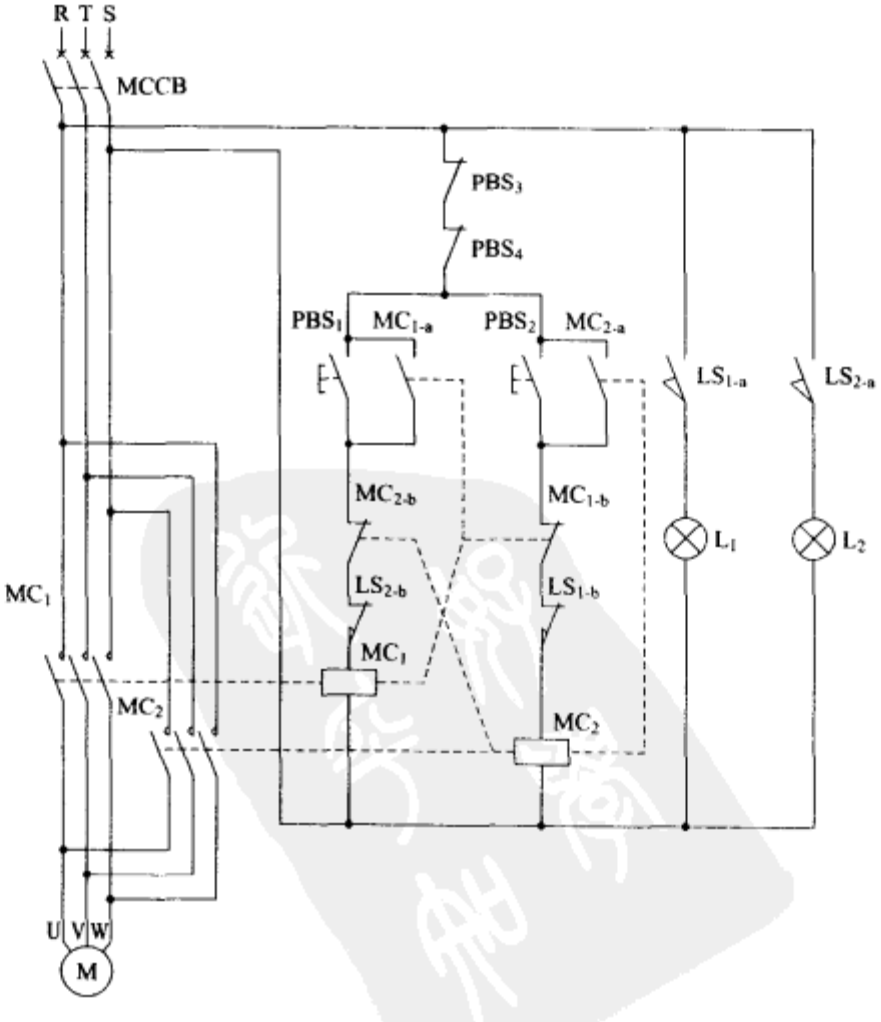


图 7.31 饭菜运送升降机的顺序图

当按下上升开关 PBS_1 时，升降机上升时所用的电磁接触器 MC_1 起动，触点 $MC_{1\text{-}a}$ 自保持，电动机正转，升降机上升。这时，触点 $MC_{1\text{-}b}$ 起着下降开关 PBS_2 的联锁作用。当升降机上升到二层的停止位置时，限位开关 LS_2 被按下，指示灯 L_2 点亮，触点 $MC_{1\text{-}b}$ 复位，联锁被解除。

在电动机 M 运转当中，如果异常情况下所用的开关 PBS_3 或 PBS_4 被按下，则 PBS_3 或 PBS_4 断开，电动机 M 便当场停止下来。图 7.32 所示为升降机的时序图。

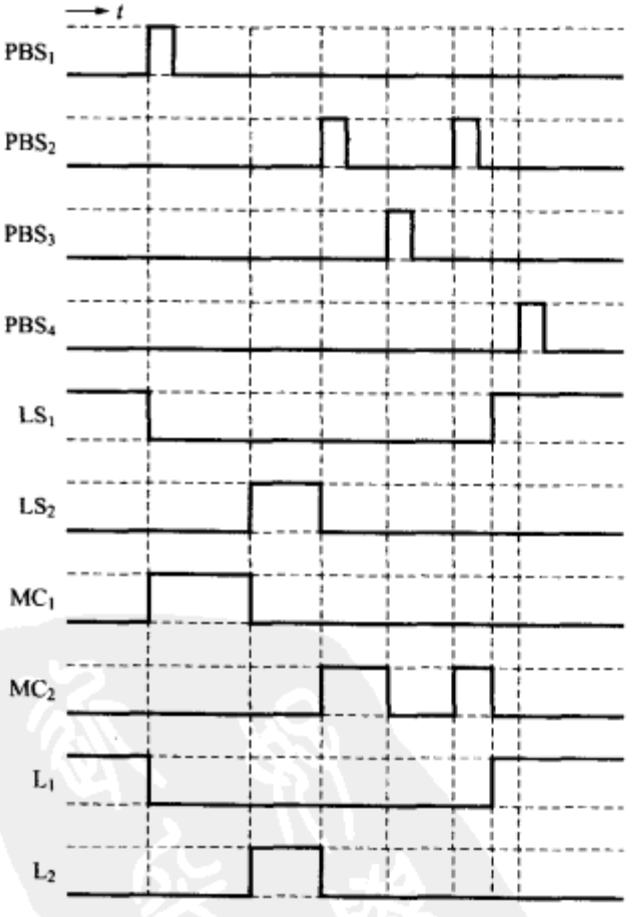


图 7.32　饭菜运送升降机的时序图

实际的饭菜运送升降机控制机构比这里的示例复杂得多。例如，一般停靠楼层都多于三层，取菜口有自动门，还装有报告升降机到达指定位置的蜂鸣器等附加装置。

12 反馈控制

要 点

反馈控制(feedback control)是一种能自动对控制结果的准确性进行判断并根据判断结果对控制动作进行修正的控制方式。这种控制方式的应用极为广泛,人们日常生活中所用的各种家用电器中,几乎无不装有由微处理器构成的反馈控制装置。

解 释

控制系统概述

控制系统

在**控制系统**(control system)描述中,为了使输入、输出及信号传递的情形易于理解,通常都把构成系统的各个单元表示成一些方框,并用连线和箭头标出各个方框之间的连接关系和信号流向。这样画出的图称为**方框图**(block diagram)。图 7.33 中用方框图示出了反馈控制系统(feedback control system)的工作原理,这个原理就是,从位于输出端的**控制量**(controlled variable)中连续地或断续地取出一小部分(即检测),将其反馈到输入端与目标值(desired value)进行比较,并根据比较的结果对控制动作进行修正,从而使控制量与目标值保持一致。

方框图

控制量

图 7.33 中所示的反馈信号是用来与目标值进行比较的,这个反馈称为**主反馈**(primary feedback)。只要是反馈控制系统,里面至少会有一个这样的反馈闭环回路。

主反馈

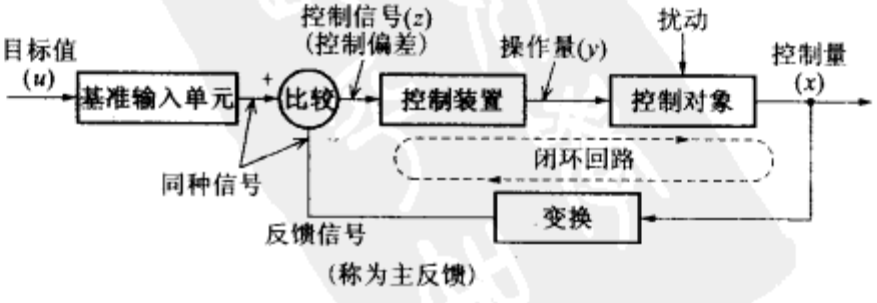


图 7.33 反馈控制的原理

控制偏差

控制装置

检测到的信号与目标值相比较后所得到的差称为**控制偏差**(error or deviation),它被送往**控制装置**(control device),

因而也称为控制信号。控制装置根据输入的控制信号产生出**操作量**(manipulated variable)来对控制对象进行操作，只要这个操作量是合适的，控制量就能够达到与目标值一致。

操作量

这里要强调的是，在将控制量与目标值相比较的时候，这两个量一定要化为同一种类的量，因而系统输入端设置了基准输入单元，反馈支路中设置了变换单元，由这两个单元把目标值和所检测到的控制量变换成可以用来进行比较的同种信号。

图 7.34 示出了一个利用反馈控制方式来保证电炉温度恒定的示例。当人从温度计上看到炉内温度偏离设定值时，就可用手来调节电压调节器的电压，使炉温向设定值变化。这种由人的手来进行的控制称为**手动控制**(manual control)。如果不经过人的手就能自动地进行控制，那就是**自动反馈控制**(automatic feedback control)，或简称为反馈控制。若将图 7.34 所示的示例画成方框图，即为图 7.35。

手动控制

自动反馈控制

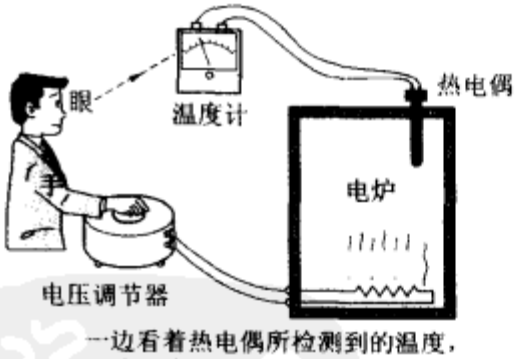


图 7.34　炉温控制示例

设炉温的目标值为 1500℃，并假定用热电偶测量这个温度时得到的电动势为 1.5V，再假定温度每变化 100℃时热电偶的电动势变化量为 0.1V。如果这时的实际控制量为 1400℃，那么热电偶的电动势就是 1.4V。将这个实际值与目标值相比较，其差值为 0.1V(100℃)，这个差值就是控制信号的值。为了使这个差值变为零，控制装置(即电压调节器)就要按照把炉温提高 100℃的要求来修正控制动作(即提高电炉的供电电压)。

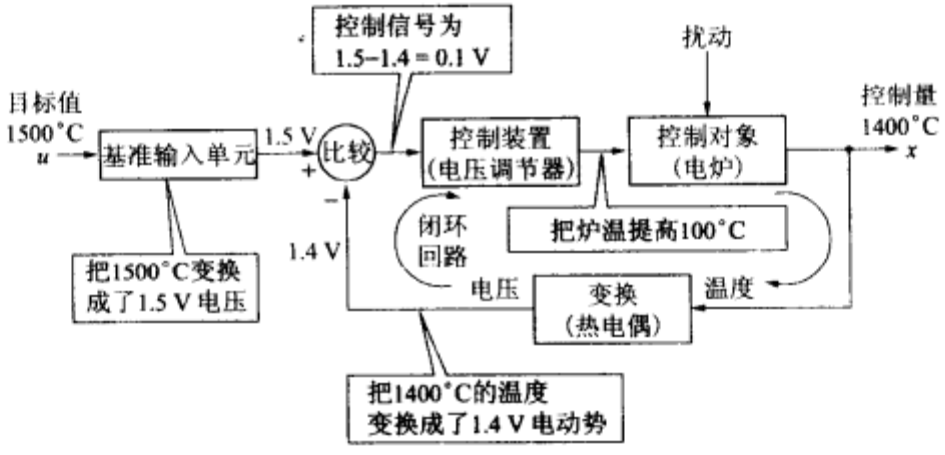


图 7.35　炉温控制系统的方框图

扰动

图中所标的**扰动**(disturbance)指的是对控制系统的正常状态会造成干扰的一些外部因素，如炉门开、闭对炉内温度的影响等。在反馈控制系统中，这种外部干扰的影响也与检测到的控制量一起反馈到了比较单元上，也就是说它已经包含在控制偏差之中，因而它也能被修正过的控制动作所消除。

反馈控制的特性

在校正控制量与目标值之间的偏差时，校正作用的强弱是非常重要的，过强和过弱都不好。图 7.36 根据系统对阶跃输入的响应情况对此进行了说明。

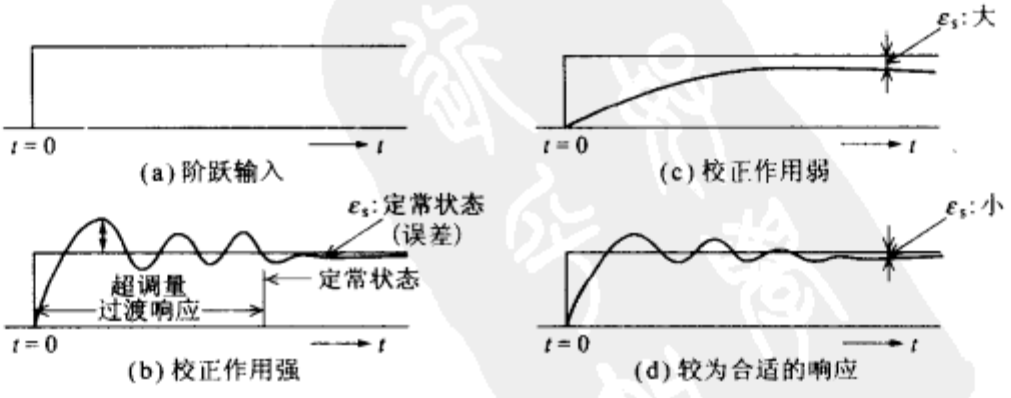


图 7.36　反馈控制系统对阶跃输入信号的响应

对于一个反馈控制系统来说，当图 7.36(a)所示的阶跃信号(step signal)加在输入端上(即设定目标值)时，当然

希望输出端的响应也是个阶跃信号。但一般的实际反馈系统都不可能达到这种理想的响应，而只能得到图 7.36(b)至图 7.36(d)所示的响应。通常将输入端所加的阶跃信号称为**阶跃输入**，将输出端对该输入信号的响应称为**阶跃响应**(step response)。图 7.36(b)是校正作用过强情况下的阶跃响应，其超调和振荡很大；图 7.36(c)是校正作用过弱情况下的阶跃响应，虽然没有超调和振荡，但接近目标值所花的时间太长；图 7.36(d)是校正作用比较合适情况下的阶跃响应，有一些较小的超调和振荡，但响应值很快就进入接近目标值的范围内了。

阶跃输入

阶跃响应

系统的阶跃响应值进入目标值附近某个一定值的区域之前，称为**过渡响应**(transient response)；此后，其响应值将稳定在一定的状态，这个状态称为**定常状态**(steady state)，定常状态时的偏差称为**定常偏差**(steady state deviation)。

过渡响应

定常状态

定常偏差

反馈控制有以下的特点：

① 反馈作用能使较差的控制对象特性得到校正。

② 反馈作用能使扰动的影响降低到一定程度。

③ 控制对象特性的变化(如制造过程和经年老化所产生的特性变化)对反馈控制效果的影响很小。

④ 无需人的干预即可使控制达到稳定，并且还可通过与计算机相结合来提高生产率以及避免让人去从事危险的工作。

由于反馈控制具有这么突出的优点，因而它在自动控制中扮演着极为重要的角色。

相关知识

按照目标值随时间变化的情形，控制系统可分为以下几种：

① 恒值控制：控制过程中目标值始终保持恒定。化学纤维制造、植物等的培养、原油精炼等主体为过程控制(process control)的场合，几乎全都采用恒值控制。

过程控制是指以温度、压力、流量、液位、浓度等工业生产当中的参数状态为控制量的一类控制，其应用领域主要为制造业、加工业以及为这些工业生产

提供环境条件的生产环节。

② 随动控制：控制过程中目标值是随着时间变化的。雷达在跟踪飞行体时所用的伺服机构(servomechanism)就属于随动控制系统。伺服机构是以物体的位置、姿态、方向等为控制量的控制机构。雷达在跟踪飞机的时候，其控制量是任意变化着的飞机位置；导弹在跟踪被攻击目标的时候，其控制量是目标与导弹之间任意变化着的方位角，因而，它们都是随动控制，都要用到伺服机构。

③ 程序控制：控制过程中目标值是按照某种程序变化的。热处理炉、退火炉、电梯速度控制等都属于程序控制。程序控制也可说是随动控制的一种。

此外，下面的两类控制是按照控制装置与驱动能量之间的关系来分类的：

① 直接控制(direct control)：驱动控制装置所需的能量直接从控制对象中获得。电暖炉温度控制中所用的双金属片调温器和抽水马桶水位控制中所用的浮子开关就属于这一类。这种控制虽然不够先进，但结构很简单，价格便宜。

② 间接控制(indirect control)：驱动控制装置所需的能量从别处取得。例如，把用浮子所检测到的水位变换成电信号以后，再用电信号来控制电动机转动，而由电动机来开关电磁阀，这样的控制就属于间接控制。

13　频率传递函数和阶跃响应

要　点

控制系统的特性取决于构成该系统的各种要素(element)。分析控制系统特性时，可以采用根据其构成要素及电路等的特性求出输出与输入之比的办法，这个输出/输入比称为传递函数(transfer function)。如果这个传递函数是用角频率 ω 作为自变量来表示的，就称为频率传递函数(frequency transfer function)。控制系统的阶跃响应可以用频率传递函数来求解。

解　释

频率传递函数

系统的频率传递函数实际上就是系统对各种不同角频率 ω(rad/s)的正弦信号的响应。在图 7.37 所示的 RC 电路中，设输入为 v_i，输出为 v_o，根据电路结构及其构成元件的特性，可列写出下列方程

$$v_o = \frac{1}{C}\int i\,dt \tag{7.1}$$

$$v_i = Ri + v_o \tag{7.2}$$

由式(7.1)和式(7.2)可得

$$CR\frac{dv_o}{dt} + v_o = v_i \tag{7.3}$$

式(7.3)可用来求解任何 v_i 作用下的 v_o 值。这里，v_i 和 v_o 是时间的函数，若将其作为复数矢量来处理，则它们可表示成 $j\omega$ 的函数 $V_i(j\omega)$ 和 $V_o(j\omega)$，于是便可得到图 7.37 所示电路的频率传递函数 $G(j\omega)$ 为

$$G(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{1+j\omega CR} = \frac{1}{1+j\omega T} \tag{7.4}$$

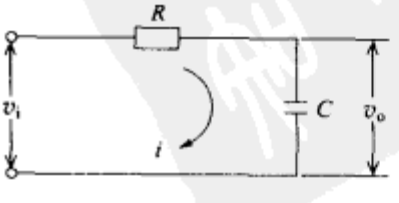


图 7.37　RC 电路

式中，$T=CR$。

这种由 $j\omega$ 的一次式给出的频率传递函数，在控制系统中称为一阶惯性环节的频率传递函数。

根据式(7.1)至式(7.3)求取频率传递函数的时候，需要进行以下的置换：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}=j\omega$$

$$\int \mathrm{d}t=\frac{1}{j\omega}$$

式(7.4)的一阶惯性环节的频率传递函数还可进一步表示成实部和虚部之和的形式，并由此求得它的绝对值和幅角，即

$$G(j\omega)=\frac{K}{1+j\omega T}=\frac{K}{1+\omega^2T^2}-j\frac{\omega TK}{1+\omega^2T^2}$$

$$|G(j\omega)|=\frac{K}{\sqrt{1+\omega^2T^2}},\underline{/G(j\omega)}=-\arctan(\omega T) \tag{7.5}$$

增益常数

式(7.5)中的 K 称为**增益常数**(Gain constant)，对于图 7.37 所示的 RC 电路来说，它的增益常数为 $K=1$。式(7.5)中的 T 称为**时间常数**(time constant)，对于图 7.37 所示的 RC 电路来说，$T=RC$。

时间常数

如果将图 7.37 的 RC 电流变成 RLC 串联电路，并且将电容器 C 两端的电压作为输出，则它的频率传递函数为

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega RC+(j\omega)^2LC} \tag{7.6}$$

该式是一个由 $j\omega$ 的二次式表示的函数，在控制系统中称为二阶惯性环节的频率传递函数。

高阶惯性环节

二阶以上的惯性环节称之为**高阶惯性环节**。高阶惯性环节一般可看作是纯滞后(dead time)环节和一阶惯性环节的组合，这样处理会带来很大方便。

纯滞后环节

所谓**纯滞后环节**，意思是当在该环节的输入端加上信号时，其输出端要经过一段时间才会有响应，所经过的这段时间称之为纯滞后时间。例如，当打开接着长橡皮管的水龙头时，橡皮管出口并未马上流出水来，而是过了一段时间才有

水流出。这段时间就是纯滞后时间，橡皮管子就是个纯滞后环节。如果设纯滞后时间为 L，则纯滞后环的频率传递函数为

$$G(j\omega)=e^{-j\omega L} \tag{7.7}$$

阶跃响应

一阶惯性环节的阶跃响应特性曲线可以通过求解式(7.3)的微分方程来得到，这里省去求解过程，只给出结果。设阶跃输入为 v_{is}，则输出 v_o 为

$$v_o=v_{is}(1-e^{-\frac{t}{CR}}) \tag{7.8}$$

图 7.38(a)所示的 RC 电路中，$R=50k\Omega$，$C=10\mu F$，设输入电压从定常状态像图 7.38(b)所示那样陡变为 $u_{is}=10V$，试求该 RC 电路的过渡响应曲线。

从给定条件可知，$v_{is}=10V$(可将其看作增益常数)，$T=CR=0.5s$，于是，可得其频率传递函数为

$$G(j\omega)=\frac{10}{1+j\omega 0.5}$$

再利用式(7.8)，即可求得输出电压 v_o 为

$$v_o=10(1-e^{-2t})$$

表 7.3 中给出了输出电压与经历时间之间的关系，按照表 7.3 中的数据所画出的响应曲线如图 7.38(c)所示。

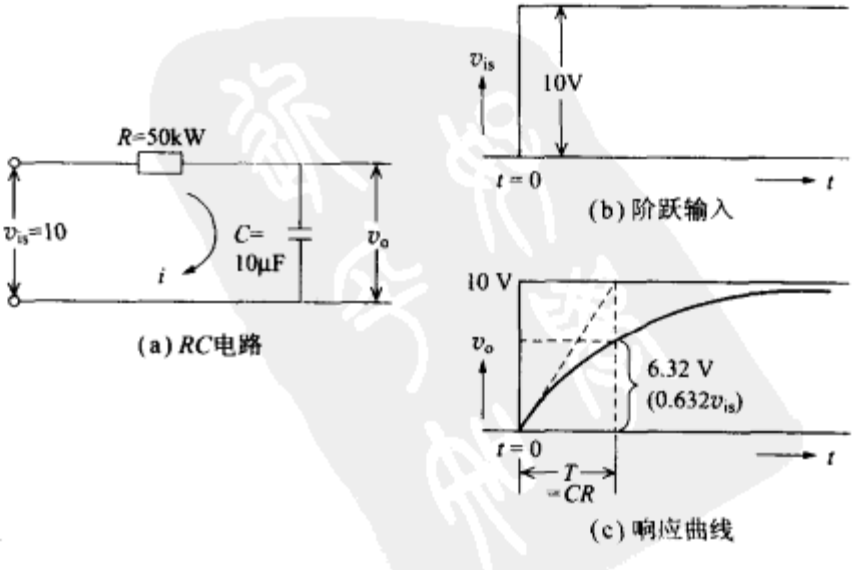


图 7.38　一阶惯性环节的阶跃响应

表 7.3 图 2(a)电路的输出电压与经历时间之间的关系

t	0	0.1	0.2	0.5	0.8	1	2	5
v_o	0	1.81	3.30	6.32	7.98	8.65	9.82	9.99

相关知识

◆ 二阶惯性环节

式(7.6)在 $CR \geqslant 2\sqrt{LC}$ 时，其分母的解为两个实数，这时的二阶惯性环节可以表示成两个一阶惯性环节之和。举例来说，若有

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega 1.5+(j\omega)^2 0.5}=\frac{1}{(1+j\omega)(1+j\omega 0.5)}$$

$$=\frac{2}{1+j\omega}-\frac{1}{1+j\omega 0.5}$$

则其阶跃响应曲线可由下式求得：

$$v_o=1-2e^{-t}+e^{-2t}$$

式(7.6)在 $CR<2\sqrt{LC}$ 时，其分母的解是两个复数，不可能像上面那种情形下求出一条简单的响应曲线。为此可对其作如下的置换，即令

$$\omega_n=\frac{1}{\sqrt{LC}},\quad \xi=\frac{R}{2}\sqrt{\frac{L}{C}} \tag{7.9}$$

并用 ω_n 和 ξ 将频率传递函数改写成

$$G(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega\frac{2\xi}{\omega_n}+(j\omega)^2\frac{1}{\omega_n^2}} \tag{7.10}$$

该式表示一个振荡型二阶惯性环节，其中，ω_n 称为固有振荡角频率(rad/s)，ξ 称为衰减率。当 $\xi>1$ 时，振荡型二阶惯性环节就是前面讲的 $CR>2\sqrt{LC}$ 的情形，它的阶跃响应为图 7.39 中所示的单调增长曲线。当 $\xi<1$ 时，它的阶跃响应为图 7.39 中所示的衰减振荡曲线。当 $\xi=1$ 时，它处于振荡与不振荡的临界状态。

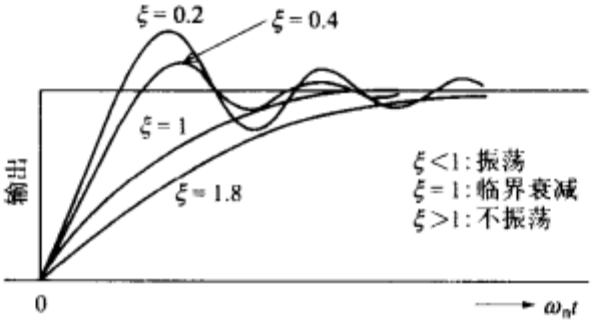
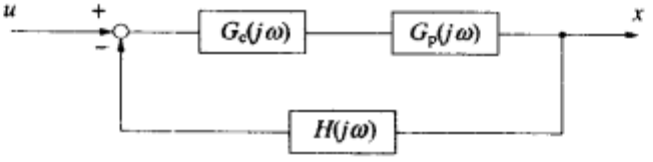


图 7.39　振荡型二阶惯性环节的阶跃响应

◆ 开环频率传递函数

分析反馈控制系统特性的时候，开环频率传递函数具有非常重要的作用。所谓开环频率传递函数(open-loop frequency transfer function)，就是反馈环内的所有各单元传递函数的乘积(见图 7.40)。



$$G(j\omega) = G_c(j\omega) \cdot G_p(j\omega) \cdot H(j\omega)$$

图 7.40　开环频率传递函数

14 方框图

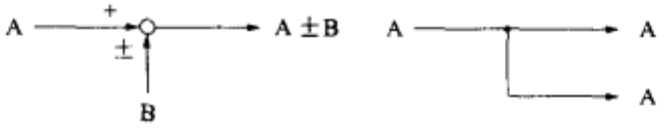
要 点

在控制系统分析中，根据各单元要素的输入、输出关系和信号流向画出方框图，并根据相应的运算规划对其加以变换，往往能够简化系统结构，使系统的整体特性更易于理解和把握。

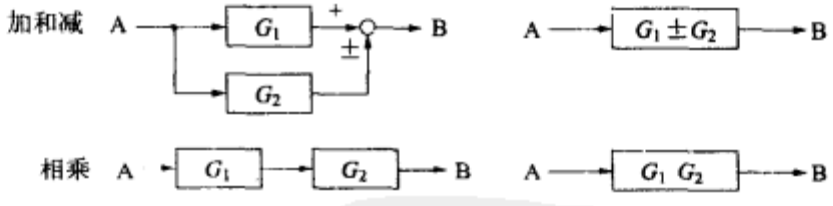
解 释

方框图的画法和变换

方框图有一些运算规则，其主要内容归纳在图 7.41 和图 7.42 之中。



(a) 相加点和引出点
相加点用○表示，引出点用·表示。



(b) 相加、相减和相乘



(c) 相加点的交换

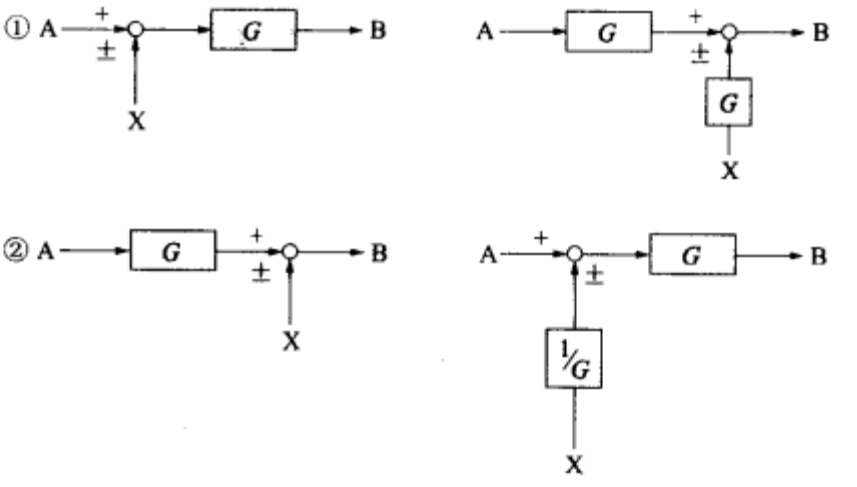
图 7.41 方框图运算规则(之一)

方框图的表示方法

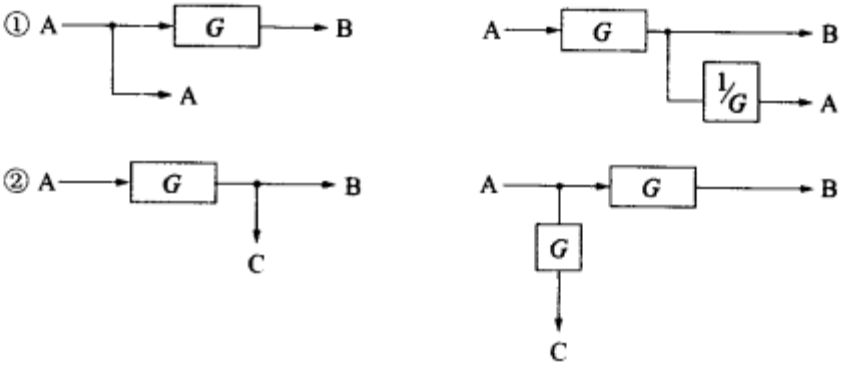
试画出 7.13 节中所示 RC 电路的方框图。

① 先根据 $v_i = Ri + v_o$ 求得 i 的表达式，即

$$i = \frac{1}{R}(v_i - v_o)$$



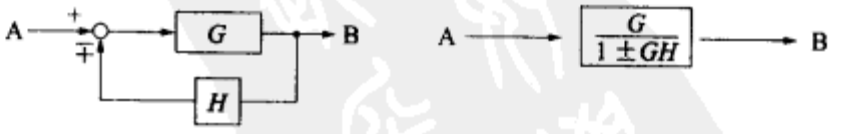
(a) 相加点的移动



(b) 引出点的移动



(c) 输入、输出的交换



(d) 反馈

图 7.42　方框图运算规则(之二)

然后将该式表示成矢量表达式，即

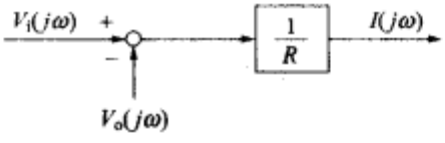
$$I(j\omega)=\frac{1}{R}[V_i(j\omega)-V_o(j\omega)] \tag{7.11}$$

② 按照同样的方法，将 $v_o=\frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t$ 表示成矢量表达式，

即

$$V_o(j\omega)=\frac{1}{j\omega C}I(j\omega) \tag{7.12}$$

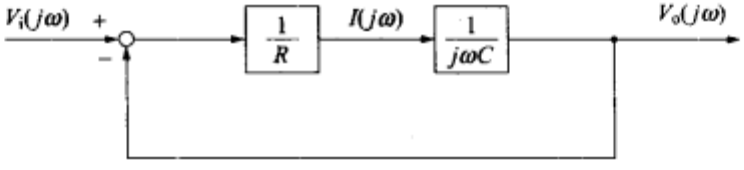
将式(7.11)和式(7.12)画成方框图，可得图 7.43(a)和图 7.43(b)。再按照信号的流向将图 6.43(a)和图 7.43(b)合成为一个图，可得图 7.43(c)。进而再按图 7.43(c)所示的运算关系进行等价变换，即得图 7.43(d)。所得结果与上一节所求得的频率传递函数一样。



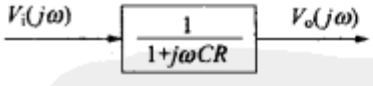
(a) 式(7.11)的方框图



(b) 式(7.12)的方框图



(c) 式(7.11)和式(7.12)合在一起时的方框图



(d) 等价变换后的方框图

图 7.43 RC 电路的方框图

15　频率响应分析法

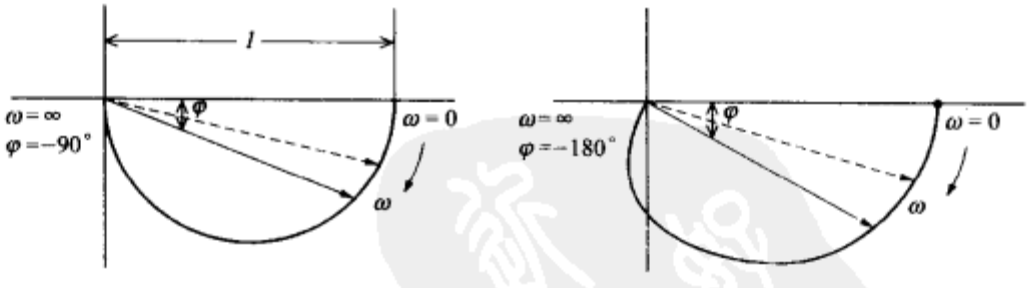
要　点

控制系统各环节的特性可以通过给该环节加上正弦波信号的方法来求得，具体作法是将所求环节的输出信号与输入信号之比表示成振幅比和相位幅角，然后再将其画成矢量轨迹或者伯德图。矢量轨迹和伯德图是控制系统分析中经常采用的方法。

解　释

矢量轨迹

本章第13节中曾通过把频率传递函数分解为实部和虚部并进而表示成由振幅比和相位幅角来表达的矢量形式(见7.13节式(7.5))。对于本章式(7.5)的一阶惯性环节，若令式中的增益常数为 $K=1$，时间常数为 $T=1$，则当角频率 ω 的值从0变到∞大时，频率传递函数在矢量平面上所画出的矢量轨迹如图7.44(a)所示，它是个半径为0.5的半圆，其矢量的幅角最大值为 $-90°$。同样，也可画得二阶惯性环节的矢量轨迹如图7.44(b)所示，它的最大幅角为 $-180°$。



(a) 一阶惯性环节　　(b) 二阶惯性环节

图7.44　矢量轨迹

伯德图

伯德图是一种以角频率 ω 的常用对数为横轴，以增益大小(dB数)和相位大小(角度数)为纵轴所画出的频率传递函数特性曲线(见图7.45和图7.46)。

下面先介绍一阶惯性环节的伯德图。

增益特性　(1) 一阶惯性环节的**增益特性**

$$g=20\lg\frac{1}{\sqrt{1+\omega^2T^2}}=-10\lg(1+\omega^2T^2) \quad (7.13)$$

① $\omega^2T^2\ll1$ 时

$$g_1=-10\lg1=0(\text{dB})$$

它是一条位于横轴上的水平直线。

② $\omega^2T^2\gg1$ 时

$$g_2=-10\lg\omega^2T^2=-20\lg\omega T$$
$$=-20\lg\omega-20\lg T(\text{dB})$$

它是一条 ω 每增大 10 倍时增益减小 20dB 的斜线(通常记为 −20dB/dec,即每 10 倍频程下降 20dB 之意),这条斜线与 g_1 直线的交点在 $\omega=\omega_s=1/T$ 处,这个交点称为转折点,频率 $\omega_s=1/T$ 称为**转折点角频率**。转折点上的增益值可由式(7.13)令 $\omega=1/T$ 求得,即

转折点角频率

$$g_3=-10\lg(1+1)\approx-3\text{dB}$$

于是,增益特性就可在半对数方格纸上像图 7.45 所示那样画出。

即首先画出 $g_1=0$ 这条水平线,然后过转折角频率点画一条 −20dB/dec 的斜线,最后再根据 $\omega=\omega_s=1/T$ 时 $g_3\approx-3$dB的关系对 $\omega=\frac{1}{T}$附近的增益曲线进行修正,画出 g_1 和 g_2 的渐近线。

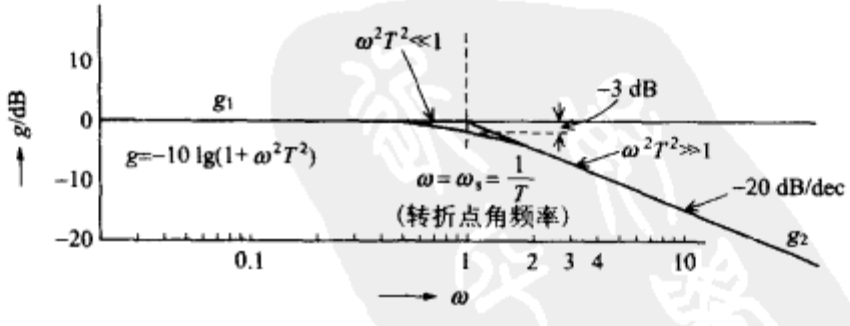


图 7.45 一阶惯性环节的增益特性($T=1$ 时)

(2) 一阶惯性环节的相位特性

$$\varphi=-\arctan(\omega T)=-\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)$$

由该式可知,$\omega\ll\omega_s$ 时,可认为 $\varphi=0^\circ$;$\omega\gg\omega_s$ 时,可认为

$\varphi=-90°$；$\omega=\omega_s$ 时，$\varphi=-45°$。根据这三个数据，即可大致画出一阶惯性环节的相位特性，如图 7.46 所示。

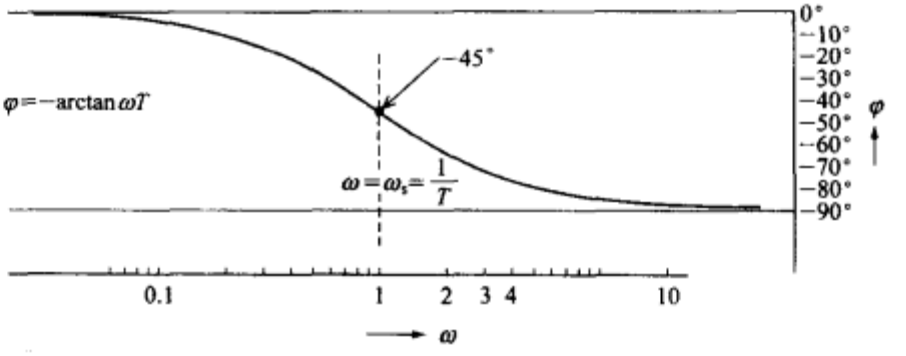


图 7.46　一阶惯性环节的相位特性（$T=1$ 时）

（3）积分环节和微分环节的伯德图

积分环节的频率传递函数可由式(7.14)给出，即

$$|G(j\omega)|=\frac{K}{\omega T},\ \underline{\angle G(j\omega)}=-90° \tag{7.14}$$

因而其增益特性和相位特性可表示成

$$\begin{cases} g=20\lg\dfrac{K}{\omega T}=20\lg\dfrac{K}{T}-20\lg\omega \\ \varphi=-90° \end{cases}$$

微分环节的频率传递函数可由式(7.15)给出，即

$$|G(j\omega)|=\omega TK,\ \underline{\angle G(j\omega)}=90° \tag{7.15}$$

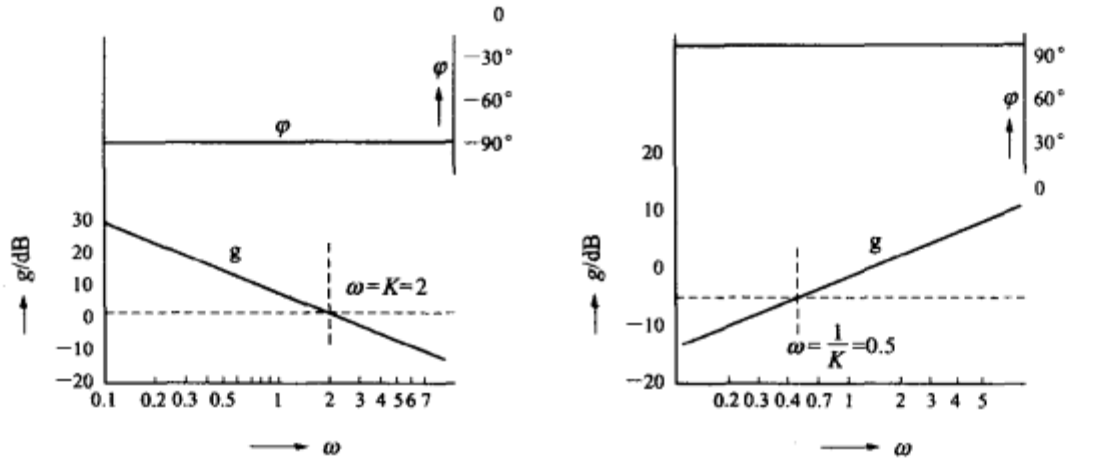
因而其增益特性和相位特性可表示成

$$\begin{cases} g=20\lg\omega TK=20\lg TK+20\lg\omega \\ \varphi=90° \end{cases}$$

根据以上的结果，积分环节的增益特性是一条斜率为 −20dB/dec的斜线，其相位特性是一条 $\varphi=-90°$的水平直线。而微分环节的增益特性是一条斜率为 +20dB/dec 的斜线，其相位特性是一条 $\varphi=+90°$的水平直线。图 7.47 中示出了 $T=1$，$K=2$ 时的积分环节和微分环节的伯德图。

（4）纯滞后环节的伯德图

根据本章节中的式(7.7)，可求得纯滞后环节的增益特性和相位特性为



(a) 积分环节$G(j\omega)=\frac{K}{j\omega T}$ (K=2, T=1时)　　(b) 微分环节$G(j\omega)=j\omega TK$ (K=2, T=1时)

图 7.47　积分环节和微分环节的伯德图

$$g=20\lg 1=0(\mathrm{dB})$$

$$\varphi=-57\omega L(^\circ)$$

其结果是增益特性为 0dB 直线，相位特性为过($\omega=1/L$, $\varphi=-57^\circ$)这个点的一条曲线，$L=2$ 时的伯德图如图 7.48 所示。

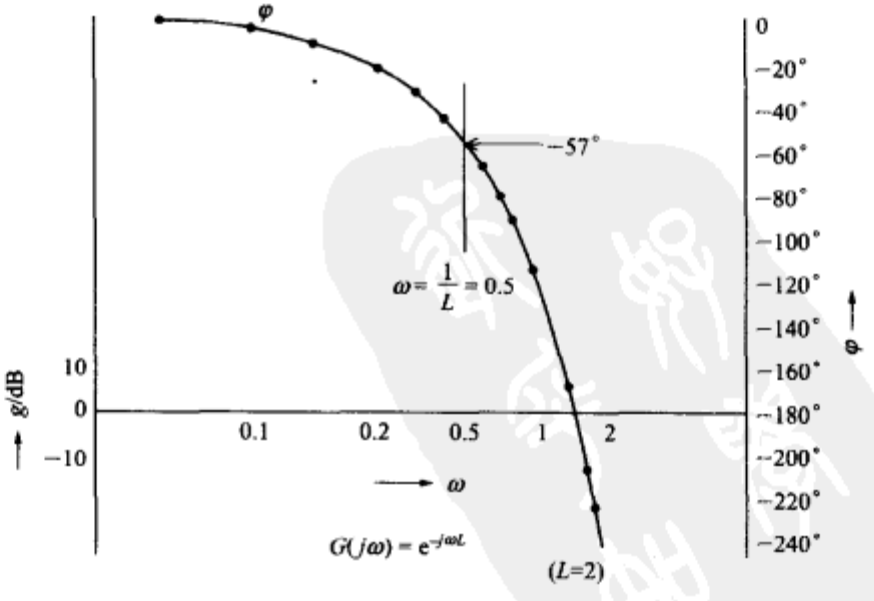


图 7.48　纯滞后环节的伯德图

(5) 纯滞后环节与一阶惯性环节相串联时的伯德图

设纯滞后环节和一阶惯性环节的频率传递函数分别为

$$G_1(j\omega)=e^{-j\omega L}$$

$$G_2(j\omega)=\frac{K}{1+j\omega T}$$

则二者相串联后的频率传递函数为

$$G(j\omega)=\frac{Ke^{-j\omega L}}{1+j\omega T}$$

由于伯德图中的增益轴是用 dB 标注的，相位轴是用角度标注的，故当设 $G_1(j\omega)$ 的相位为 φ_1（$G_1(j\omega)$ 的 $g_1=0$）；$G_2(j\omega)$ 的增益为 g_2，相位为 φ_2 时，$G(j\omega)$ 的增益和相位都可由相加运算来求得，即

$$g=g_2$$

$$\varphi=\varphi_1+\varphi_2$$

具体的作法是先在半对数方格纸上分别画出 g_1、g_2 和 φ_1、φ_2，然后再分别把它们逐点加起来就行了。

16　不同规律的控制动作的特性

要　点

加在控制对象上的控制动作，可以是连续的，也可以是不连续的。连续控制动作的规律有比例(P)、积分(I)和微分(D)；不连续动作的规律多为一开一关的二值式动作。

解　释

□ 连续控制动作的特性

当控制装置的方框图为图 7.49 时，控制偏差与操作量之间的关系为

$$y=\frac{G}{1+GH}z$$

一般情况下 $G\gg1$，因而操作量 y 可表示成

$$y=\frac{1}{H}z$$

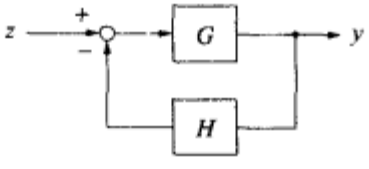


图 7.49　控制装置

当 H 为常数时，令 $K_P=1/H$，这个 K_P 便是比例增益(proportional gain)，这样，操作量 y 又可表示成

$$y=K_P\cdot z$$

该式表明，操作量 y 与控制动作信号 z 成正比，故称为比例动作(**P 动作**)。P 动作的阶跃响应如图 7.50 所示。图中表明，随着 K_P 的增大，它的响应逐渐变为幅度越来越大的振荡，并且定常偏差虽然在变小，但并不能达到零。

P 动作

为此，可以追加一个能在偏差存在期间持续起作用的积分动作(**I 动作**)，使之构成 **PI 动作**。PI 动作的表达式为

I 动作

PI 动作

$$y=K_P\left(z+\frac{1}{T_I}\int z\mathrm{d}t\right)\quad(T_I\text{ 为积分时间常数})$$

追加了 I 动作后的阶跃响应如图 7.51 所示，虽然定常偏差能够达到零，但响应时间也随之变长了。

为了缩短响应时间(即通常所说的**快速性**)，可以再追加一个能对输入信号变化迅速响应的微分动作(**D 动作**)，这样就构成了 **PID 动作**。PID 动作的表达式为

快速性

D 动作

PID 动作

$$y=K_P\left(z+\frac{1}{T_I}\int z\mathrm{d}t+T_D\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}\right)$$（T_D 为微分时间常数）

PID 动作的阶跃响应如图 7.52 所示，它能够得到既没有定常偏差又具有快速性的理想响应。

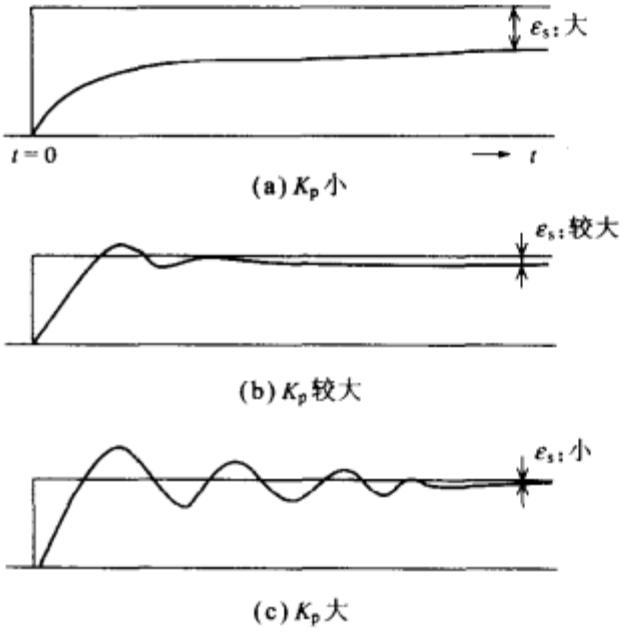


图 7.50　比例增益与定常偏差大小的关系

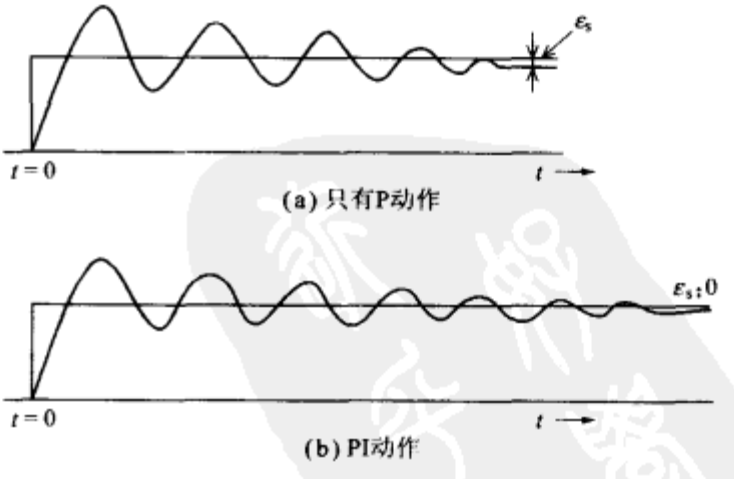


图 7.51　P 动作与 PI 动作的比较

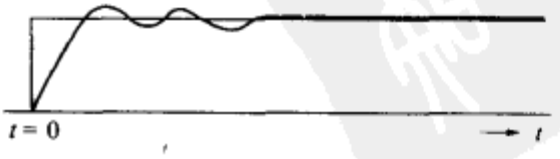


图 7.52　PID 动作的阶跃响应

不连续控制动作的特性

不断地重复着一开一关的二位式动作就是不连续控制动作。在这种控制动作的控制下，控制量总是以目标值为中心上下摆动，不可能保持在固定值上。这种情形称为**周期性振荡**(cycling)，其响应如图 7.53 所示，特点是除了在目标值附近周期性地上、下振荡外，并且响应的变化总是比输入信号慢一些。这种控制动作多用于电暖炉之类对控制精度要求不高的设备中。

周期性振荡

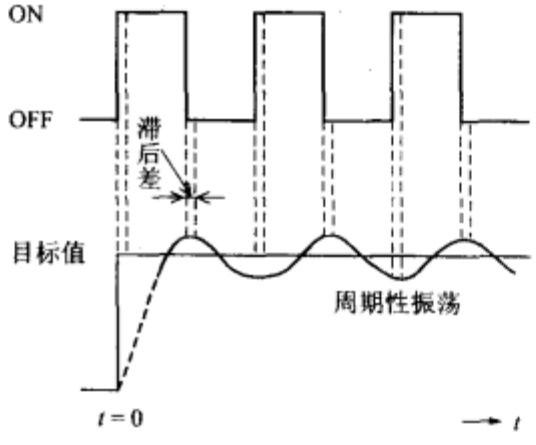


图 7.53　二位式控制的响应

相关知识

◆ 定常偏差

开环频率传递函数为 $G(j\omega)$时的定常偏差 ε_s 可表示成

$$\varepsilon_s=\frac{1}{1+G(j\omega)}v_s=\frac{1}{1+K_R}v_s$$

式中，K_P 为 $\omega=0$ 时的开环频率传递函数的值。

从该式也可推知，如果开环频率传递函数中含有积分环节，则 $\omega=0$ 时 $G(0)=\infty$，这就是为什么积分环节能够消除定常偏差的缘故。

17　响应的改善

要　点

衡量一个控制系统好坏的标准是系统是否稳定、响应速度是否快、定常偏差是否小。这三方面的要求之间有时是有矛盾的，因而，要得到好的响应，应该重点改善控制系统中最为需要的内容。

解　释

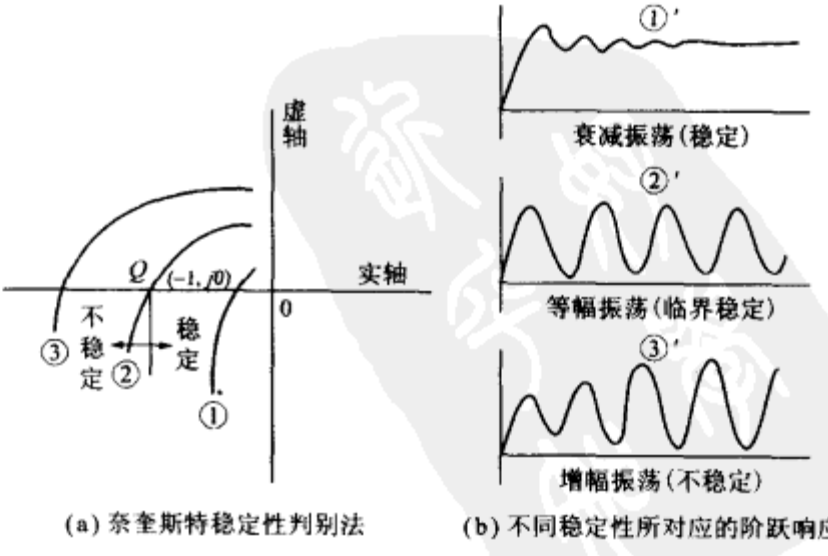
稳定性判别法

判别控制系统稳定性的方法很多，这里仅对奈奎斯特判别法和利用伯德图进行判别的方法加以说明。

(1) 奈奎斯特稳定性判别法

如图 7.54(a)所示，将控制系统开环频率传递函数的矢量轨迹画在复平面上，如果轨迹从 $Q(-1,j0)$ 点的右侧穿过横轴，则控制系统是稳定的；如果是从左侧穿过，则它是不稳定的；如果正好从 Q 点穿过，则它是临界稳定的，也就是说，$Q(-1,j0)$ 这个点是稳定与不稳定的边界点。这种判别方法称为**奈奎斯特稳定性判别法**。图 7.54(b)给出了与上述三种状况相对应的阶跃响应曲线。

奈奎斯特稳定性判别法



(a) 奈奎斯特稳定性判别法　　(b) 不同稳定性所对应的阶跃响应

图 7.54　奈奎斯特稳定性判别法及其与阶跃响应判别法的对应关系

增益裕度
相位裕度

除了判别系统是否稳定之外，还要有衡量其稳定程度的手段，这个手段就是**增益裕度**（gain margin）和**相位裕度**（phase margin），图 7.55 就是用来求增益裕度和相位裕度的。设矢量轨迹与实轴的交点为 P，则增益裕度 g_m（dB）可如下求得：

$$g_m = 20\lg\frac{OQ}{OP} = 20\lg\frac{1}{OP} = -20\lg OP$$

若 $g_m > 0$，则系统稳定；若 $g_m < 0$，则系统不稳定；若 $g_m = 0$，则系统为临界稳定。

相位裕度是这样确定的，设矢量轨迹与半径为 1 的单位圆的交点为 R，则相位裕量 φ_m 为

$$\varphi_m = \angle ROQ$$

$\varphi_m > 0$ 时，系统稳定；$\varphi_m < 0$ 时，系统不稳定；$\varphi_m = 0$ 时，系统为临界稳定。

如果减小增益裕度和相位裕度，则控制系统会向着不稳定状态变化，而如果增大增益裕度和相位裕度的话，系统的响应特性将会变迟钝，不利于快速性。实际当中正是依据这种关系，通过补偿回路的组合来改善控制系统的稳定性和快速性的。

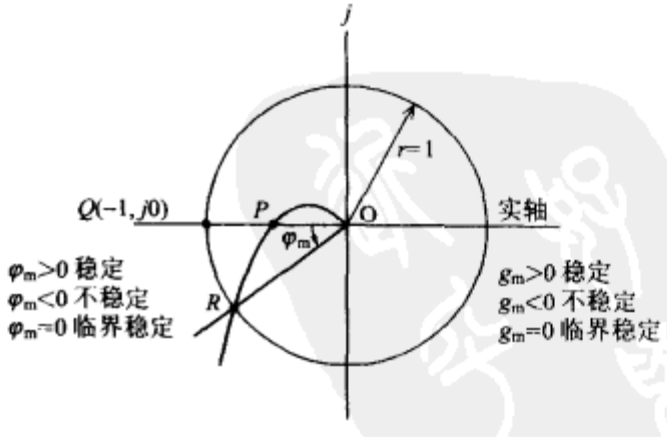


图 7.55 增益裕度和相位裕度

（2）利用伯德图进行稳定性判别

反馈控制系统中，当开环频率传递函数的增益小于 1 时，系统是稳定的。也就是说，当开环频率传递函数的相位为 $-180°$ 时，系统在增益小于 0dB 的情况下是稳定的。以此

为基准来设置坐标刻度，然后将伯德图画上去，可得到如图7.56所示用于判别系统稳定性的伯德图。

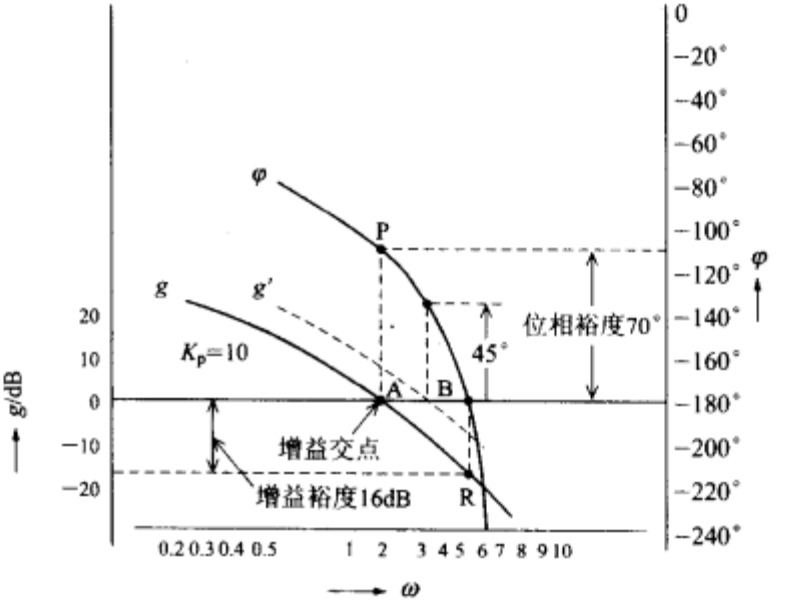


图7.56　利用伯德图判别稳定性

图7.56中，既是$g=0$dB又是$\varphi=180°$的这条线被作为判别控制系统稳定性的基准线，A点称为增益交点，B点称为相位交点，AP称为相位裕度，BR称为增益裕度。于是，在AP位于基准线上侧(正)，并且BR位于基准线下侧(正)的情况下，系统是稳定的；反之，系统是不稳定的。而当A点与B点重合时，系统为临界稳定。

图7.56是个伺服系统的伯德图，它的相位裕度过于大了些。这种情况下，可以通过增加补偿回路等办法，将增益特性曲线往上拉一拉，使相位裕量变小些。

一般情况下，伺服机构的相位裕度在40～65°之间较为合适，过程控制系统的相位裕度在20～50°之间较为合适。

现在就来看一看根据图7.56所示的伺服系统伯德图怎样把相位裕度调整到45°。由图7.56可知，要把相位裕度调整到45°，只要把增益特性曲线g向上移10dB，使之位于g'处就行了。

要使增益提高10dB，可如下进行：

根据　　$20\lg K=10$

即

$$\lg K=\frac{10}{20}=0.5$$

可得

$$K=3.16$$

将 g 的 K_P 乘以这个求得的 K 值，得到一个新的 K_P' 值，即

$$K_P'=K_P\times K=10\times 3.16=31.6$$

这样，所得到的新增益特性曲线 g' 就比 g 向上移动了 10dB。

如果要让增益特性曲线向下移动，只要将 K_P 除以 K 就行了。

18　计算机控制

要　点

随着计算机的小型化和价格的降低，计算机控制技术不仅在工业生产和铁道运行这类大规模系统中得到了应用，而且在工作机械、汽车、电气化产品等众多领域里得到了广泛应用。

解　释

计算机控制

计算机控制是通过将控制条件和控制动作等编制成程序存入计算机内来进行的，其动作过程如图 7.57 所示。首先，外部信息经传感器变换成电信号，电信号通过输入接口传给计算机。然后，计算机根据内部所储存的指令对电信号进行处理，并将处理结果通过输出接口传给控制对象。控制对象按照计算机所发出的控制信号进行操作之后，其控制动作结果再度通过接口传给计算机，并等待下一个输入信号的到来。整个过程就是以计算机为中心不断地从外部取得信息和利用程序进行信息处理的过程。



图 7.57　计算机控制的机制

计算机控制的优点在于它可以通过软、硬件结合和变更程序的办法来方便地改变动作条件。例如，为了在复杂条件下执行动作，可以把多种顺序控制组合在一起；为了使反馈控制的动作更平稳光滑，可以根据反馈量来改变目标值；为了能自由地变更动作条件，可以在判断部分采用计算机。

向计算机输入信息是以 bit 为单位进行的，计算机的处理能力决定了所能输入的 bit 数。一个传感器 1bit，两个传感器就是 2bit。如果 bit 数按照 1bit 两个动作，2bit 四个动作那样增加的话，输入的信息将按 bit 数成倍增长。对于不

同的动作对象来说，数据输入量各不相同，动作复杂的机械和机器人所需要的 bit 数当然要多一些，而一般的家电产品，具有 4～8bit 处理能力的计算机就够用了。

相关知识

◆ 控制用的计算机

① 单片式微型计算机：单片式微型计算机最初是以简易计算处理为目的而开发的集成电路，它的运算电路和控制电路组合在一片 LSI 中，具有小型、轻便的优点。大多数家电产品里都装有这种芯片。由于安装上去后芯片的程序难以变更，因而一般都是作为专用计算机来使用的。图 7.58 是单片机的照片。

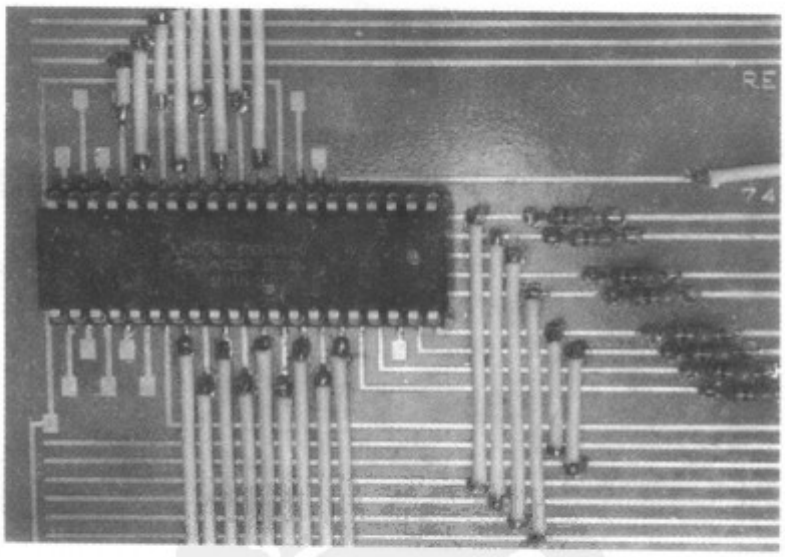


图 7.58 单片式微型计算机

② 单板式微型计算机：单片式微型计算机配上最低限度的 ROM 和接口电路，并安装在一块电路板上，就成了单板式微型计算机。它可以根据控制对象的需要来增加各种部件。与单片式微型计算机相比，单板式微型计算机的应用性更好，工业机械、汽车及机器人中都可安装。图 7.59 是单板式微型计算机的实物照片。

③ 个人计算机：微型计算机配上键盘等输入装置、CRT 和打印机等输出装置及外部存储装置，就构成了个人计算机。它更便于使用，软件变更非常容易，能够针对不同的控制对象编写程序，应用性也很好。此外，它也可用于单板式微型计算机等机器的软件开发。图 7.60 是个人计算机的设备照片。

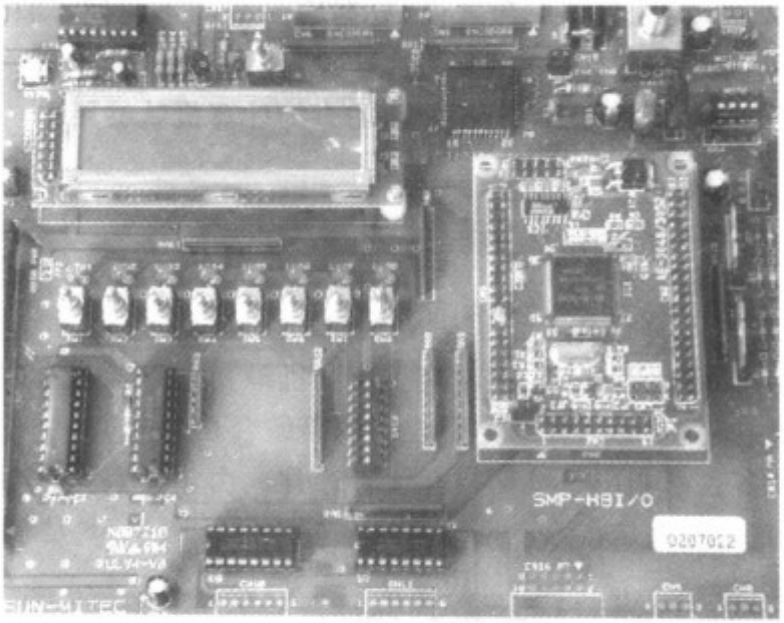


图 7.59　单板式微型计算机



图 7.60　个人计算机

19 外部设备的连接

要 点

计算机控制是通过把控制的对象连接到计算机上来使之产生动作的。单板式微型计算机和个人计算机在连接外部设备时有多种规格。

解 释

串行连接和并行连接

如图 7.61 所示，计算机与外部设备的连接方式有串行连接和并行连接两种。**串行连接**方式中，数据是在信号线上 1bit 接 1bit 地按顺序传送的，因而只用两根信号线（一根信号线和一根地线）就够了。

串行连接

并行连接方式是多 bit 数据同时传送，因而数据传送速度快，但所需的信号线较多，配线复杂，成本高。此外，多 bit 数据同时传送的方式对数据同步的要求很高，这是个比较难的问题。对于高速数据传送来说，另一种措施就是提高串行连接方式的传送速度。

并行连接

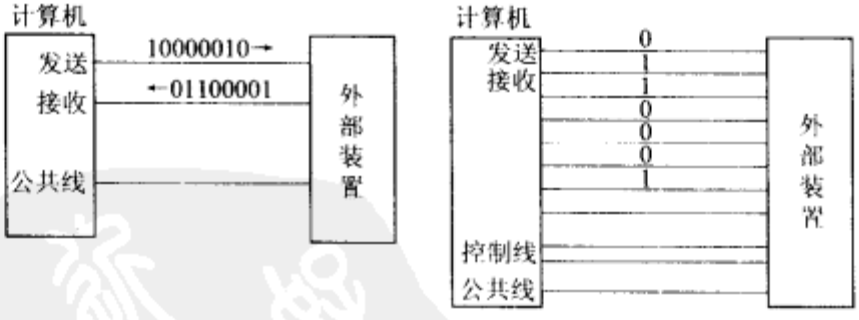


图 7.61 串行连接与并行连接

RS232C

它是一种串行连接规格，在有线或无线方式的远距离控制中用于连接通信机器。其传送速度较慢。

GP-IB

可以认为它是 RS232C 的并行连接方法，是连接检测仪器的规格。传送速度与 RS232C 一样慢。由于它能连接多达 30 台的仪器，因而应用范围很广。

SCSI

它是一种经过 ANSI(美国标准化协会)进行了标准化的并行连接方式,可连接一台外部设备。若给每台设备各分配一个 SCSI 编号,则各外部设备可以并行连接(数字链)。最多可连接 8 台设备,这个数量显得少了些,但速度较快。现在,连接台数多、通用性好、性能已大幅度提高了的后继规格 SCSI-2 和 SCSI-3 已经普及了。

USB

这是目前的主流规格,它充分发挥了串行连接和并行连接的优点,可以按树状结构连接外部设备,并且能在无需关断计算机电源的情况下与外部设备进行连接。控制用的机器中,很多产品都采用了这种规格的产品。像 SCSI 一样,传送速度更快的后继规格 USB2.0 也已经得到普及。

IEEE1394

这是一种今后有希望普及的规格,它是通过把 USB 的优点导入 SCSI 所得出的,能够对数据进行快速处理。像 USB 一样,它也能在不关断电源的情况下与外部设备进行连接,并且还可以由连接电缆供给电源。

另外,它可以与一般的家电产品连接,还可用于连接视频摄像机、BS 数字调谐器、视频录像机等,进一步拓宽了计算机控制的应用范围。

相关知识

◆ 连接外部设备时的注意事项

以往的计算机控制,都需要按照外部装置的连接关系,针对每种用途配备一台计算机。现在,由于连接规格的扩展和软件功能的提高,一台计算机已经能够同时控制多台外部设备和多个作业了。

这样一来,在一台计算机连接多种外部设备的情况下,有些问题就必须特别注意。例如,当连接由高电压来驱动的外部设备时,要采取光耦合等办法来进行电气绝缘;在预计会产生噪声和受到干扰的地方,要对外部装置和计算机本体同时采取防噪声及抗干扰的措施,以保证计算机工作的稳定性。

20 接口电路

要 点

接口电路是一个用于计算机与其他装置之间传送输入、输出信号的部件，它能把其他装置的动作电压、驱动电流、信号速度等变换为可以用计算机来处理的数据。

解 释

接口与端口

外部接口
内部接口

在个人计算机中，与打印机、键盘、鼠标、扫描仪等外部设备相连接的出入口称为**外部接口**，连接 FDD、HDD、CD 等部件的内部连接部分称为**内部接口**。接口的连接方式有图 7.62 所示的串行连接方式和图 7.63 所示的并行连接方式两种，这些接口与机器之间的信号进出部分称为端口。

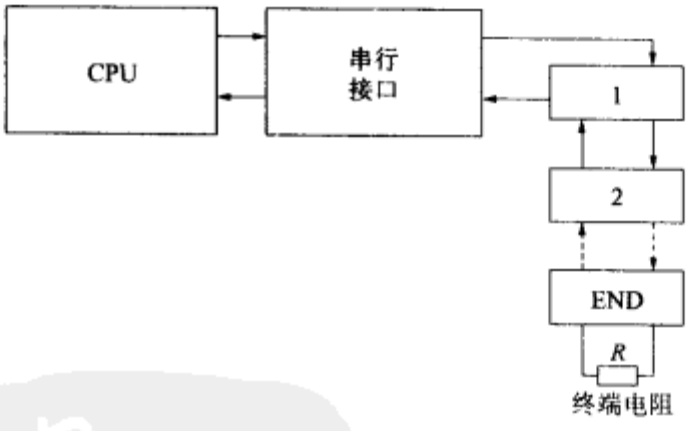


图 7.62 串行连接的接口

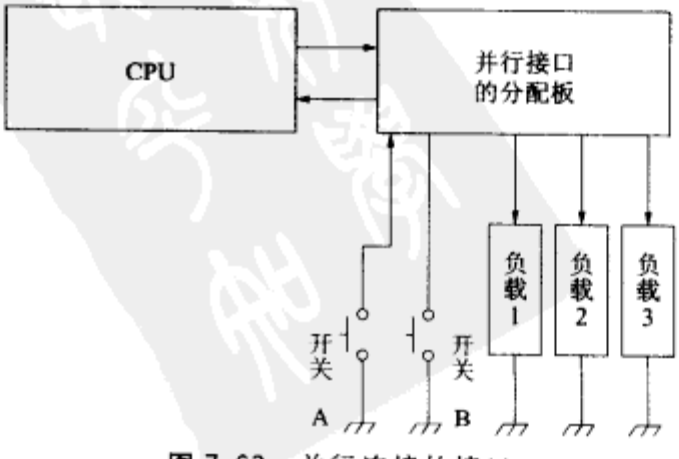


图 7.63 并行连接的接口

有些接口具有多个端口。

在根据计算机控制系统的要求来连接外部设备时，计算机有哪些接口，这些接口有哪些端口，接口需要用什么样的软件来驱动等问题，必须仔细调查清楚。

通用接口

PPI

单板式微型计算机和个人计算机等机器中，用于外部设备控制和数据传送的通用接口称为 **PPI**（Programmable Peripheral Interface），它是一个具有三端口的接口，能够在程序控制下实现 8bit 并行信号的输入和输出。为了驱动这个接口，需要由程序指令发出控制信号，并要有三个端口（A 端口、B 端口、C 端口）的输入输出条件和动作的状态信号。

由于它只能处理 8bit 数据，因而不适合于高级控制，但具有能连接多台外部设备的优点。

图 7.64 是通用接口的实物照片，图 7.65 是其原理。

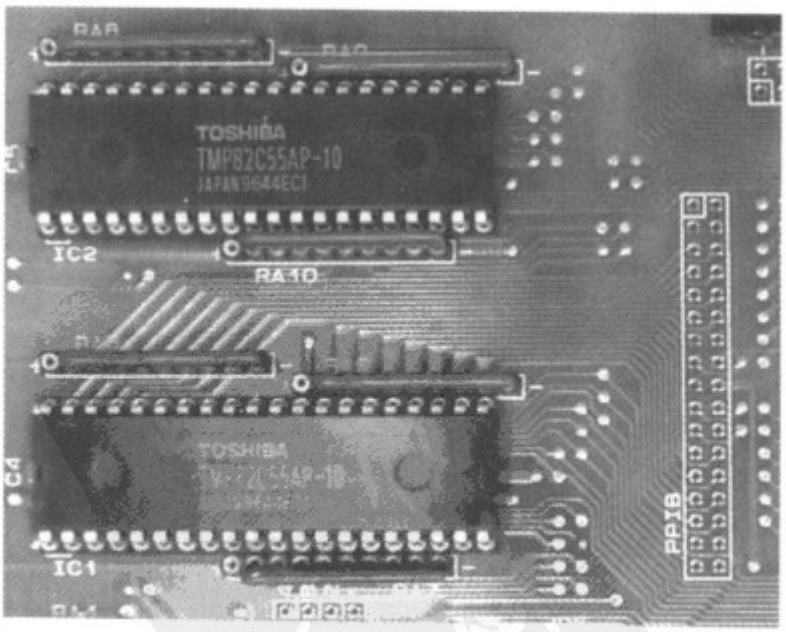


图 7.64　通用接口

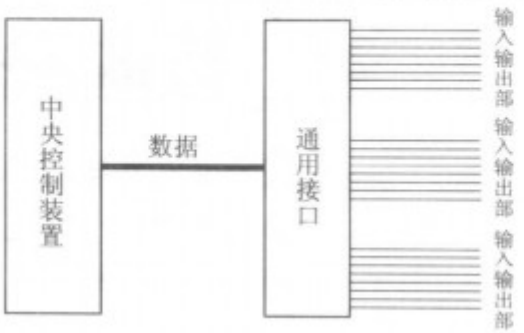


图 7.65 通用接口的原理

相关知识

◆ **PIC**

从接口把运算装置和存储装置编入 LSI 而得到的装置称为 PIC(Peripheral Interface Controller)。与微型计算机相比,PIC 的功能有限,处理能力和存储容量也不大,但只用 PIC 就可以构成控制部分,体积小,需要的元、器件少,电子电路的制作也比较简单。由于它能够用软件来设定动作,因而应用范围很宽。

图 7.66 是 PIC 的实物照片。

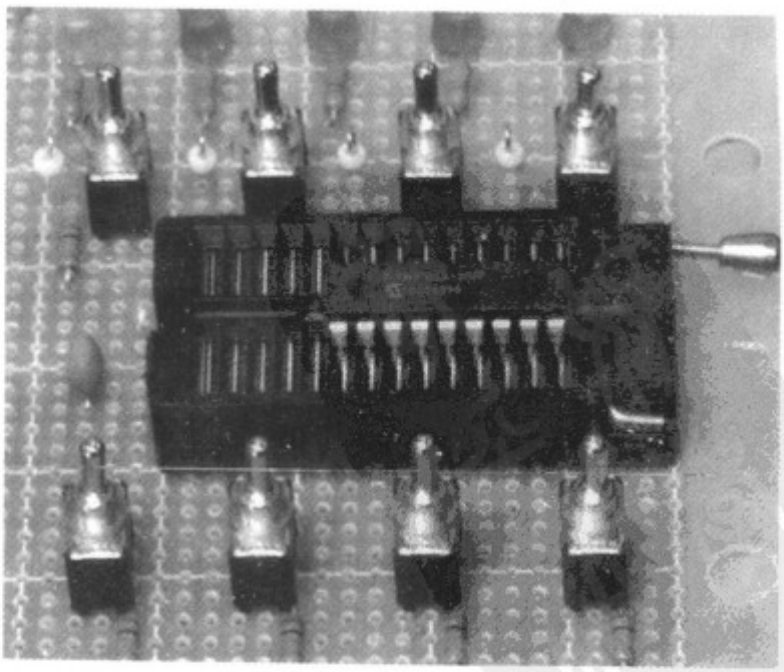


图 7.66 PIC 实物照片

21　机器人控制

要　点

机器人控制是计算机控制的一个重要应用领域，它能够利用与人的五种感觉（视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉）相同的传感器来感知外部信息并发出相应的动作。

解　释

示教机器人

这种机器人的动作取决于它事先所存储下来的程序。动作程序可以从动作起点开始，将各个动作的顺序作为指令存储下来，并根据各个动作中如何取得传感器所发出的数据等作业动作来作成。

这个动作程序的作成称为示教，它扮演着有效控制机器人的重要角色。此外，示教中还可安装用于避免因误动作而造成事故的安全装置。实际当中，也可以不让机器人动作，而用个人计算机进行动作仿真的离线示教。

摇臂机器人

摇臂机器人的手臂与人的手臂一样，是由多个关节连在一起构成的。它的关节由各个伺服电动机来驱动。增多关节个数能得到更加准确的复杂动作。工业上所用的摇臂机器人常用于焊接、喷漆、复杂装配等危险较多的场所和需要在短时间内进行高效作业的场所，另外，它还可以通过更换手臂来扩大作业范围。图7.67是摇臂机器人的应用实例。

视觉机器人

给摇臂机器人装上视觉传感器或摄像机，它就能利用图像识别和图像处理技术来进行零、部件形状和颜色的判别及确定位置等作业。视觉机器人在生产线上有着广泛的应用，图7.68即为其一例。

搬运机器人

这种机器人也称为无人运货车，常用于产品和零部件的出库和入库、生产线上的材料输送等。它的行走是利用



图 7.67 摇臂机器人应用实例



图 7.68 视觉机器人应用实例

位于地面各点上的传感器来确定路径和起、停动作的，图 7.69 是其实例。

双足步行机器人

它是能重现人的步行状态的机器人。这种机器人经常出现在电影、电视和动画当中，而真正实现起来却是非常困难的。



图 7.69　搬运机器人实例

双足步行机器人并不是只要左右脚交互迈步就能行走了，而是还有重心移动、关节联动动作等复杂因素，要解决的问题是很多的。不过，随着计算机的小型化、伺服电机驱动能力的提高及传感器性能的改善，双足机器人的步行已经实现。现在，不仅是步行，而且正在开发更接近人的动作的机器人。双足步行机器人越与人的动作接近，其应用范围也就越广阔。图 7.70 是一个双足步行机器人实例。

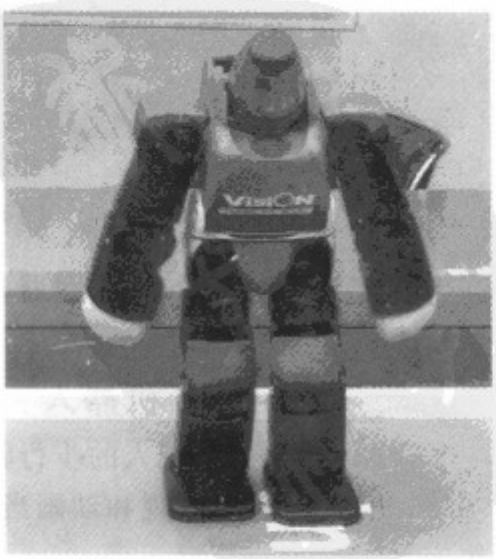


图 7.70　双足步行机器人

第 8 章

通信与网络

促成有线通信实用化是莫尔斯（美），在此之前，很多人对用电进行通信进行了研究。1809年曾默林格（德）利用伏打电池和电解原理发明了气泡式电报机。1831年希林格（俄）发明了电磁式电报机。莫尔斯的有线电报机就是在希林格电报机发明后的1837年发明成功的，以促成有线通信的实用化。1876年贝尔（美）发明了有线电话；1878年爱迪生提出了送话器方案；1888年赫兹（德）依据麦克斯韦（英）的电磁波理论用实验方法产生出了电磁波；1896年马可尼（意）和波波夫（俄）进行了无线通信实验；1899年马可尼成功地在英、法之间实现了无线通信。

随着计算机技术和网络化的发展，通信技术、互联网的发展更为迅速。现在，已可快捷地传送文字、语音、静止图像、运动图像等多种形式的信息了。今后，有线电话、移动电话、无线电广播、电视广播等现存的通信系统将与互联网相融合，构建一个便利而丰富多彩的世界。20世纪是全球规模的通信时代，而利用通信卫星进行远程教育的21世纪正在期待着宇宙规模的通信时代。

● 责任编委
山本　诚
● 执　　笔
山本　诚(1, 2, 7 ~ 13, 19)
安藤武德(3 ~ 6)
寺岛和彦(14 ~ 18)

1　通信概述

要　点

所谓通信，就是把文字、语音、图像等信息变换成电信号，并把这种电信号传到远方。按照传输信号的特点，通信方式可大致分为模拟通信和数字通信两大类。按照通信双方两点之间通信的方向性，通信方式又有单工、半双工、全双工之分。

解　释

通信系统的基本构成

如图 8.1 所示，通信系统由发送端设备、传输线路及接收端设备三大部分构成。发送端把文字、语音、图像等信息变换成电信号，传输线路把电信号传给接收端，接收端再把电信号还原成原来的信息形式。传输线路既可以是有线传输的，也可以是无线传输的。

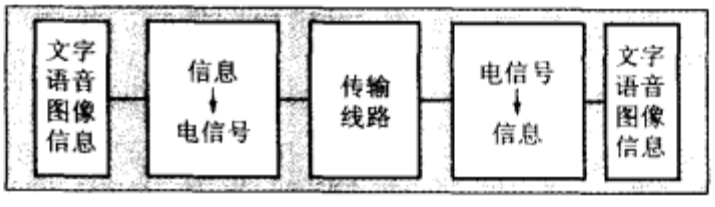


图 8.1　通信系统的基本构成

有线通信与无线通信

用金属电线或光缆来传送信号的通信称为有线通信，这种情况下的金属线和光缆称为有线传输线路；以电磁波或光波来传送信号的通信称为无线通信，这种情况下的电磁波和光波称为无线传输线路。

模拟通信与数字通信

模拟通信是指把信息变换成电压和电流的连续变化来进行的通信，如图 8.2(a)和(b)所示；数字通信是指把信息变换成由电流和电压的有无所表示的二进制数等形式来进行的通信，如图 8.2(c)和(d)所示。

直流传输方式与交流传输方式

数字通信中，二进制数 0 和 1 是用 0V 和 5V 这样的直流电压来具体实现的。0V 和 5V 直流信号直接在传输线路上传送的通信方式称为直流传输方式（见图 8.2(c)）；0V 和 5V 直流信号被置换成交流信号参数的变化后再送上传输线路进行传送的通信方式称为交流传输方式（见图 8.2(d)）。

单工通信、半双工通信和全双工通信

单工通信

半双工通信

全双工通信

单工通信是指一方只管发送另一方只管接收的单方向通信（见图 8.3(a)），电视广播、无线电广播、测量数据传送等属于这种方式；**半双工通信**是指通信双方共用一条传输线路或一个频带来交互式进行通信（见图 8.3(b)），对讲机属于这种方式；**全双工通信**是指通信双方同时各用一条传输线路或一个频带分别进行发送或接收的通信（见图 8.3(c)），电话属于这种方式。

单信与复信

对讲机那样的发送和接收只能交互进行的通信方式称为单信，电话那样的发送和接收能够同时进行的通信称为复信。因而，半双工通信属于单信，全双工通信属于复信。

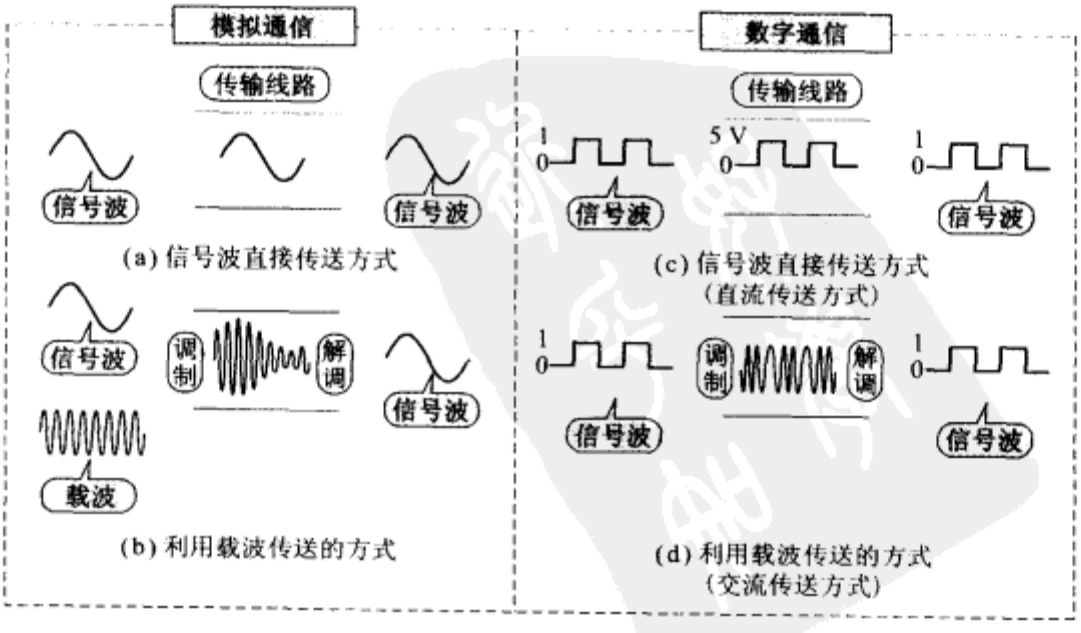
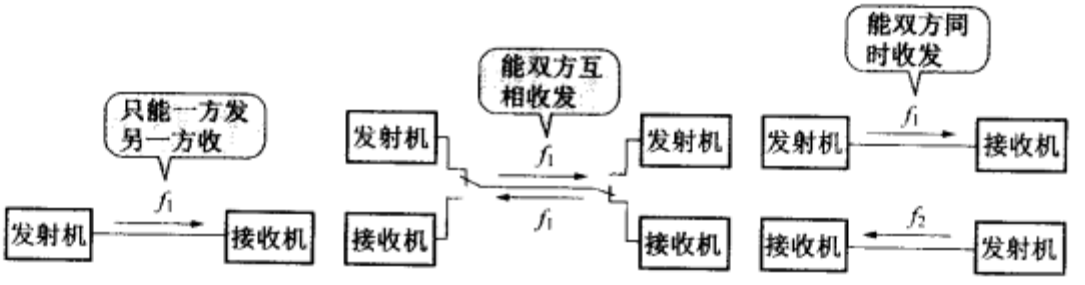


图 8.2　模拟通信与数字通信



(a) 单工方式　　(b) 半双工方式　　(c) 全双工方式

图 8.3　通信方式的种类

2　调制与解调

要　点

让载波的某个参数随着信号波变化的处理过程称为调制，经过调制后的载波称为已调波；从已调波中分离出信号波的处理过程称为解调。调制的方式有振幅调制、频率调制等，相应的解调方式称为振幅解调和频率解调。

解　释

载　波

承载着信号波向远方传播的电磁波称为载波，载波的频率远高于信号波的频率。在日本的电波法中，300×10^4 MHz以下的电磁波称为电波。

调制与解调

让载波的某个参数随着信号波变化的处理过程称为调制，经过调制后的载波称为已调波，从已调波中分离出信号波的处理过程称为**解调**。调制的方式有振幅调制、频率调制等，相应的解调方式称为振幅解调和频率解调。

解调

振幅调制

振幅调制

AM

载波振幅随着信号波变化的调制方式称为**振幅调制**，也称为**AM**(Amplitude Modulation)。AM已调波的波形如图8.4所示，调制的程度用调幅度来表示，调幅度＝(信号波振幅/载波振幅)×100(%)。调幅度超过100%的调制称为**过调制**，过调制的情况下，信号波形就失真了。AM已

过调制

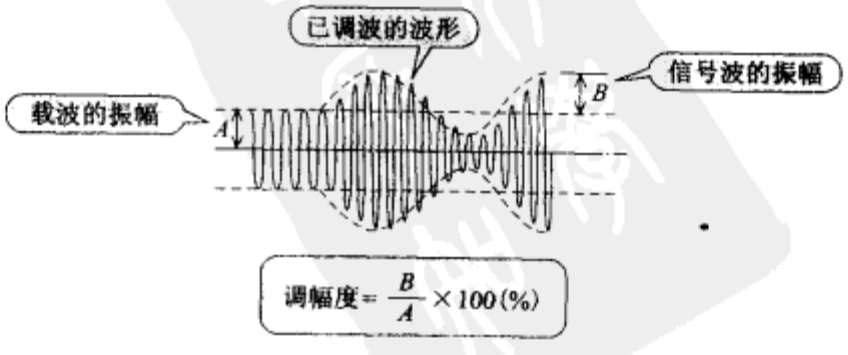


图8.4　振幅调制及其调幅度

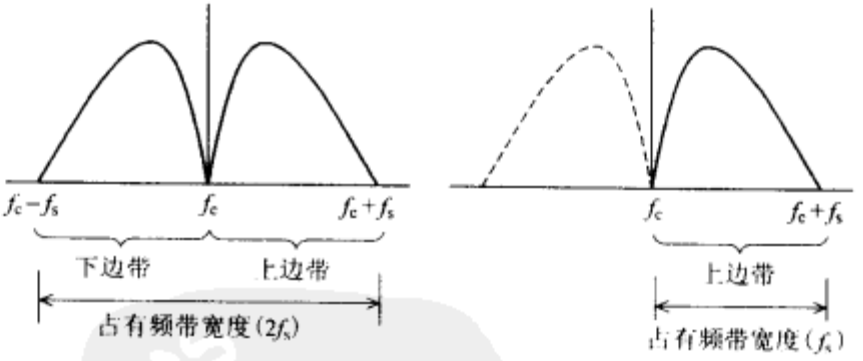
调波一般可利用二极管的单向性来解调，由于这种解调方法是直接从已调波的包络线（如图 8.4 中的虚线所示）来获得信号波，因而也称为包络检波。

振幅调制单边带与调制(SSB)

振幅调制中，如果载波是频率为 f_c 的单一正弦波，而信号波的频率范围为 $0 \sim f_s$，则已调波的频率中将会出现 $f_c \sim (f_c + f_s)$ 和 $f_c \sim (f_c - f_s)$ 这样的频率成分，也就是说，已调波的占有频带为 $2f_s$，其频带如图 8.5 所示。位于载波频率 f_c 上方的频带称为**上边带**，位于载波频率下方的频带称为**下边带**。上边带与下边带以载波频率 f_c 为对称轴而呈现完全对称的关系，二者所包含的信息完全相同。只用上边带或只用下边带进行通信的通信方式称为单边带调制（single sideband modulation）。单边带通信的调制电路和解调电路比较复杂，但它比双边带通信方式的占有频带窄，因而具有传输功率小的优点。

上边带

下边带



(a) AM通信方式　　(b) SSB通信方式

图 8.5　AM 通信方式与 SSB 通信方式

频率调制

载波的频率随着信号波变化的调制方式称为**频率调制**，也称为 **FM**（Frequency Modulation）。FM 已调波的波形如图 8.6 所示。信号波振幅最大时载波频率所产生的偏移，称为**最大频偏**。FM 已调波的调制程度用调频指数来表示，调频指数＝（最大频偏/信号波频率）。FM 已调波的频谱相当复杂。

频率调制

FM

最大频偏

用于对 FM 已调波进行解调的电路称为频率鉴别器或

简称鉴频器。频率鉴别器的工作原理可以理解为先把载波的频率变化变换成载波振幅变化，然后再通过对振幅变化的载波（即振幅调制波）进行检波而取出信号波。

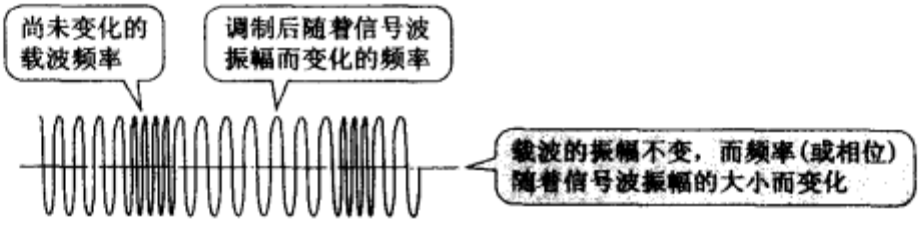


图 8.6 频率调制

3　电话的工作原理与电话机

要　点

电话是一种双向通信设备，它能在发送端把声音信号变换成电信号，并经由传输线路传给接收端，再由接收端把电信号变回声音信号。

解　释

电话的工作原理

电话的工作原理如图 8.7 所示。当声音所产生的空气压力作用到送话器的振动膜上时，振动膜随之振动，加在碳粒上的压力随之变化，碳粒的接触电阻也就随之变化，从而使流过受话器线圈的电流发生变化。这个电流称为通话电流。通话电流流过受话器线圈时所产生的电磁力又使受话器的振动膜产生振动，于是，受话端便重现出了送话端的声音。

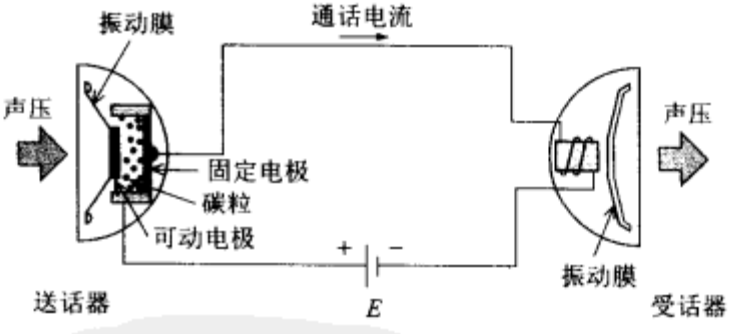


图 8.7　电话的工作原理

电话机的基本组成

拨号机构
振铃机构

电话机由拨号机构、振铃机构和通话机构组成。**拨号机构**向交换机发出呼叫某个特定用户的拨号信号；**振铃机构**以铃声或音频（电子声）显示对方是否接通；通话机构的作用是把发话者的声音变换成电信号和把来自对方的电信号变换成声音，以及调整音量的大小使对话更加舒适。

按键式电话机的工作原理

图 8.8 是按键式电话机的组成电路。当话筒被拿起时，叉簧开关 HS_1 和 HS_2 随即动作，电话局方面便由交换机送来应答信号。这时，若按下对方电话号码的按键，按键

拨号信号(PB信号)

拨号信号发生器便发出**拨号信号(PB信号)**。二极管D_3～D_6所组成的电路是一个直流电压极性转换电路，它的作用是不管来自交换机的直流电压如何，都能保证加在信号发生电路LSI上的电压为同一极性。手动/自动开关是用来调节PB信号电平的。

PB信号是通过按动号码键来送给交换机的一种组合信号，该信号由图8.9所示的纵横两组高音群频和低音群频搭配组合而成。例如，当按动5号按键时，由频率为770Hz和1336Hz组合成的PB信号就被送往交换机，交换机中便可用滤波器从PB信号中分离出这两个高、低音频信号，从而识别出电话机所拨出号码是"5"。

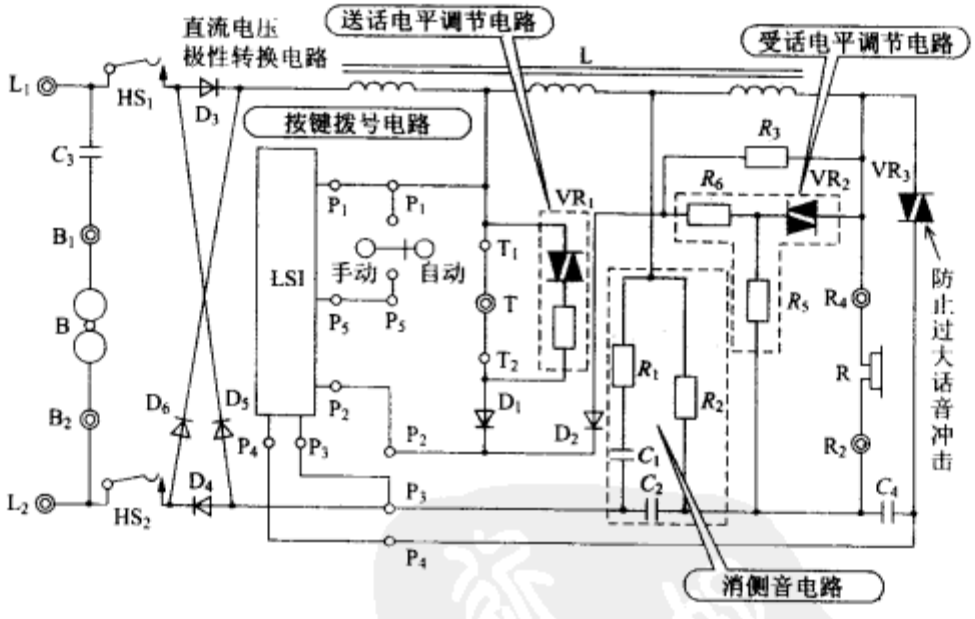


图8.8　按键式电话机的电路结构

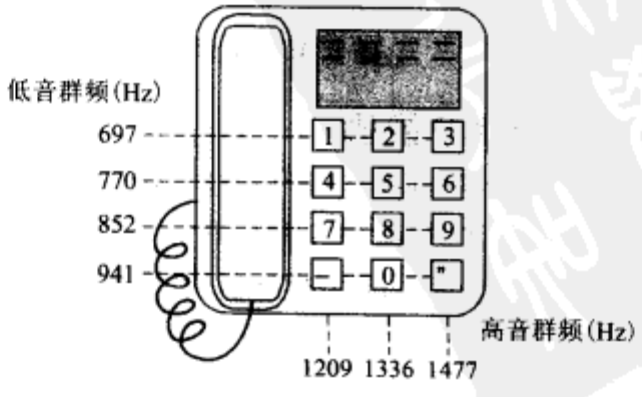


图8.9　PB信号的频率

4　电话与电话交换机

要　点

电话网中的交换机在提高各终端话机间的接通率、增加通信系统功能和经济效益，以及实现信息化社会的新电话业务方面起着重要作用。随着计算机和数字技术的发展，数字交换机已经成为主流交换机。

解　释

电话网与电话交换

电话网是一个由电话机、用户线路、电话交换机和传输线路所构成的网络，其基本结构如图 8.10 所示，从上到下依次为总局（RC：Regional Center）、中心局（DC：District Center）、分局（TC：Toll Center）、端局（EO：End Office），用户电话机连接在端局的交换机上。

电话交换是指把通话双方的电话机接通的过程。当某一用户电话机要求与另一用户通话时，送话端的端局交换机就通过用户线、局间传输线路和各级电话局的交换机把连接在受话端端局上的用户电话机接通（见图 8.10）。

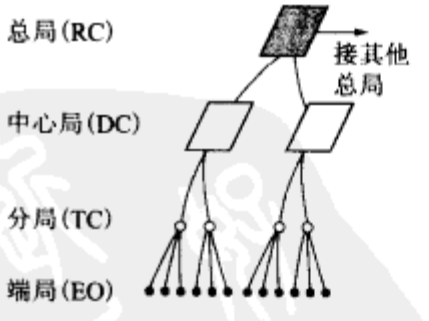


图 8.10　电话网的基本结构

数字交换机

时分话路交换

数字交换机是采用时分复用数字信号（参看本章 7 节）和时分话路交换方式进行电话交换的。所谓**时分话路交换**方式，就是通过改变时分复用数字信号的时间段配置来实现电话交换的方式。时分话路交换装置由时间开关和空间开关组成。图 8.11 示出了数字交换机的工作原理。

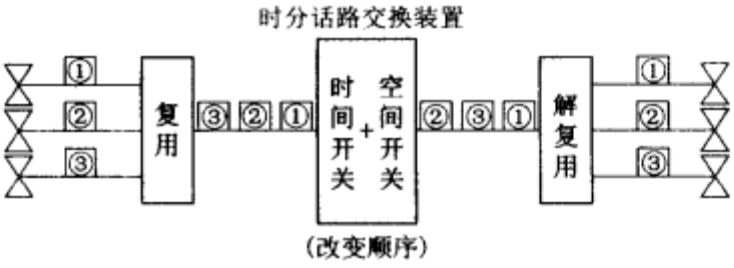


图 8.11　数字交换机的工作原理

5　ISDN 的基本构成

要　点

ISDN(Intergreted Services Digital Network)的意思是综合业务数字网,这种通信网能够通过一个标准接口来处理来自电话机、传真机、数据终端设备等的不同种类信息,B-ISDN 是高速度的综合业务数字网。

解　释

ISDN

ISDN 由两个通信速度为 64Kbit/s 的 B 信道和一个作为控制线路的 16Kbit/sD 信道构成。ISDN 的接口最多能连接 8 台终端,其特点如下(见图 8.12):

① 它能受理电话机、传真机、数据终端设备等各种不同种类的通信业务。

② 它是一种高速度、高品质的数字公众网。

③ 它的接口为国际标准接口。

④ 送往通信网的信息和控制信号是分别传送的,因而机器的连接部分可以在通信途中移动使用。

⑤ 一个接口上可以连接多个终端,能同时与不同的用户进行通信。

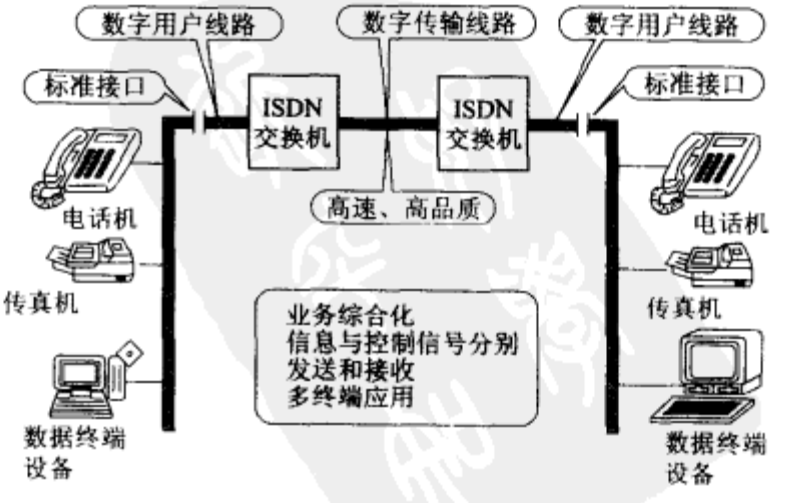


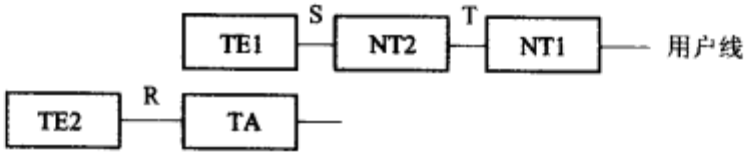
图 8.12　ISDN 的业务特点

B-ISDN

B-ISDN是以光纤网和ATM技术为基础的ISDN，其特点是数据信号速度可变，最高可达622Mbit/s。

接口的参考点

ISDN可以连接各种各样的装置，但进行通信的两个装置之间要按照ISDN接口的参考点S点、T点及R点来连接，如图8.13所示。ISDN与模拟电话机的连接要通过终端适配器(TA)来连接。



NT1：网络及接口侧的传输线路的最末端(相当于DSU)
NT2：交换和维护功能(相当于PBX)
TE1：ISDN标准终端
TE2：ISDN非标准终端(模拟电话机等)

图8.13 ISDN的装置和参考点

相关知识

◆ ISDN的配线

ISDN要通过DSU(Digital Service Unit)来连接。室内配线的方法有：①短距离总线配线，② 延长总线配线，③ 点对点配线。最长距离随配线方法和电缆芯线线径的不同而异，短距离总线配线不超过200m，点对点配线不超过1000m。如图8.14所示。

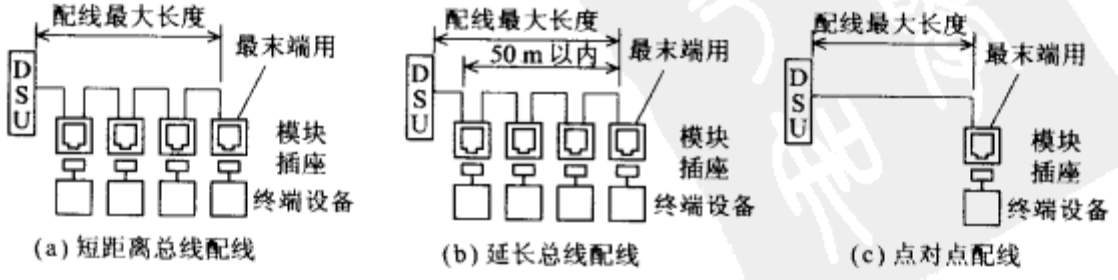


图8.14 ISDN的配线方式

◆ 通信用的的配线连接头和电缆

ISDN 中，连接标准终端的连接头在 JIS X 5110 中已有规定，电缆要采用 8 极 8 芯的电缆。

6　传输线的种类和构造

要　点

传输线的电气性质与通常的“集中参数电路”不同，它是一种“分布参数电路”。按其使用目的的不同，分为对称电缆、同轴电缆及网络电缆等。

解　释

传输线

传输线

有线通信中，当连接发送端和接收端的电线长度大于所传送信号的波长时，这种电线称为**传输线**，传输线上的电压和电流的分布与一般电路中的状况是不同的。

当给图 8.15(a)所示的无限长平行电线接上信号源时，电线上的电压和电流分布状态并不是一样的，这种情况下，平行电线可以等效为图 8.15(b)所示的电路，也就是说，传输线可以看成是由均匀分布的串联电阻 R、串联电感 L、并联电容 C 和并联电导 G 所构成的电路，称之为**分布参数电路**。单位长度(1km)传输线所相当的 R、L、C、G 称之为线性参数。相应的分布参数电路的阻抗(电压与电流之比)Z_0 称为传输线的特征阻抗，特征阻抗由式(8.1)来表示，即

分布参数电路

$$Z_0=\sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \tag{8.1}$$

式中，$\omega=2\pi f$，f 为信号源的频率。

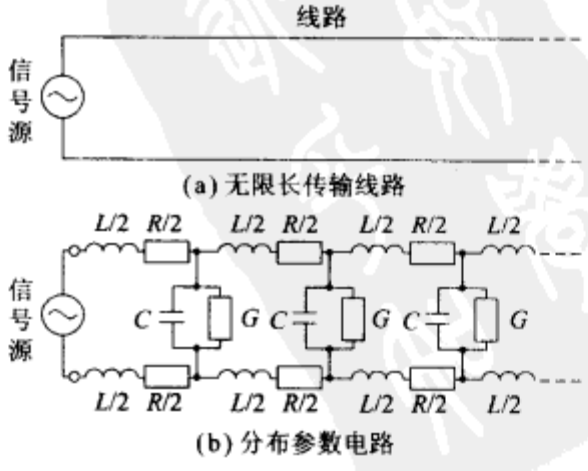


图 8.15　分布参数电路

通信电线的种类

由于要在各种各样的环境下敷设，有线通信线路应有足够的机械强度和稳定的传输特性，经济性要好，并且应便于维护。

有线传输线路的电线常采用以金属为导体的通信电缆和光缆。通信电缆有对称电缆和同轴电缆两种，对称电缆又可分为二芯电缆和四芯电缆等。

对称电缆

对称电缆以 0.3～0.9mm 的铜线作为芯线，外面用聚乙烯或绝缘纸加以绝缘，两根线呈绞合在一起的形状。

实际应用中，为了提高电缆的柔性（可弯曲的程度）和改善窜话特性（防止其他传输线中的信号窜进来），常把 4 根线归为一组或者再把它们一层一层地捆起来使用。图 8.16 示出了对称电缆的构造。

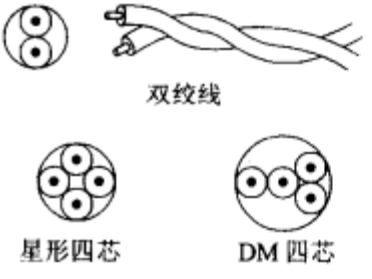


图 8.16　对称电缆

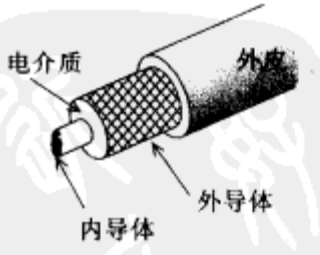


图 8.17　同轴电缆

同轴电缆如图 8.17 所示，它是由内导体和包围着内导体的同心圆外导体所构成的。与对称电缆相比，同轴电缆防止外部干扰和防止高频窜话的特性较好，传输损耗也比较小，可用于宽频带传输。

10BASE-T、100BASE-TX 等网络中所使用的电缆有 UTP（Unshielded Twist Pair）电缆和 STP（Shielded Twist

UTP 电缆

STP 电缆

Pair)电缆。**UTP 电缆**是非屏蔽的双绞线电缆，它没有电磁保护作用，结构上是由两根绞合为一组的 4 组线合在一起构成的。**STP 电缆**是在 UTP 电缆的基础上增加了屏蔽而制成的，常用于噪声较多的场所。如图 8.18 所示。

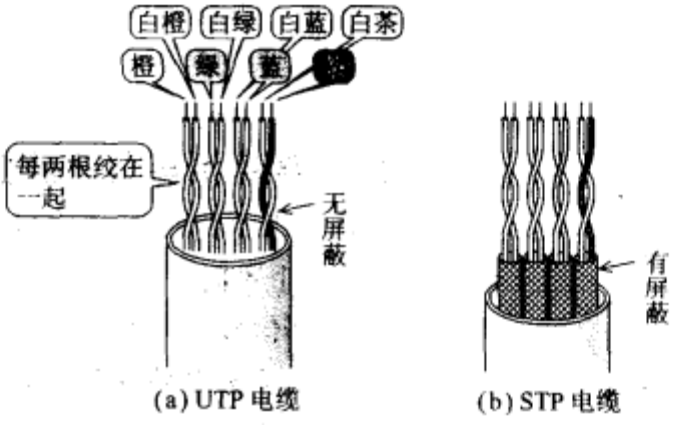


图 8.18 UTP 电缆和 STP 电缆的构造

7　多路复用通信的原理

要　点

多路复用通信是指用一条传输线路同时传送多个信号，这是一种高效利用传输线路的技术。多路复用的方法有频分多路复用(FDM)和时分多路复用(TDM)等。

解　释

频分多路复用与载波通信

这种方式用于模拟传输的频分多路复用。通过对多个信号各分配一个不同频率的载波把传输线路的频带按频率分割开来，而全部信号共同使用一条传输线路同时加以传送。

频分多路复用

图 8.19 是**频分多路复用**原理的示意。发送端的输入信号 A、B、C 分别调制到载波 f_1、f_2、f_3 上，经滤波后作为复用信号送给传输线路。接收端进行与复用相反的处理，取出原来的信号。

多路复用的调制方式有幅度调制(AM)、频率调制(FM)及相位调制(PM)等。其滤波器要用到低通滤波器(LPF)和带通滤波器(BPF)。

载波通信

由于这种频分复用方式是采用不同频率的载波来实现复用的，所以也称为**载波通信**。

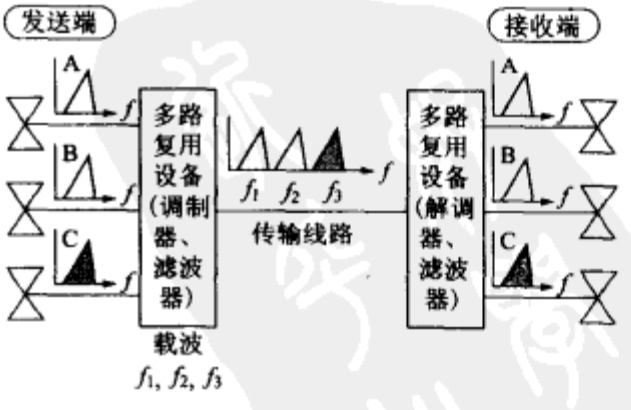


图 8.19　频分多路复用的原理

时分多路复用

这种方式用于数字传输的多路复用。发送端按一定的

周期将多个信号轮流取出并按顺序送给传输线路，接收端按照相同的时序（同步）接收发送端发来的脉冲序列，并按原来的信号通道分开，从而恢复原信号。这种将一条传输线路按时间分割成多个通道来提高传输效率的方式称为**时分多路复用**方式。图 8.20 是时分多路复用原理的示意。当复用信号是声音信号之类的模拟信号时，要先把模拟信号用脉冲编码调制（PCM）变换成数字信号。

时分多路复用

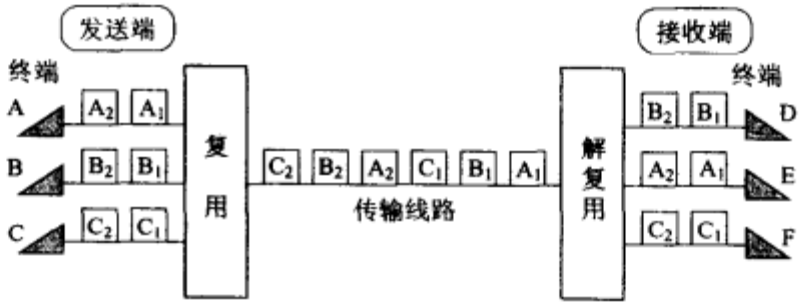


图 8.20　时分多路复用的原理

相关知识

◆ 同步与多路复用通信方式

时分多路复用通信中，当被复用的数字信号时钟频率不同时，其同步方法有旗脉冲同步方式和网同步方式两种。

旗脉冲同步方式是在多个输入信号中间插入标志脉冲，把各输入之间的频率凑齐，并使之与网内时钟同步。

网同步方式大致可分为主从同步、独立同步和互同步。从经济性和稳定性方面考虑，一般多采用把从局同步在主局时钟上的主从同步方式。

◆ 脉冲编码调制

脉冲编码调制（PCM：Pulse Code Modulation）就是把声音等模拟信号的幅度大小按一定的周期进行抽样，并将抽样值变换成数码脉冲。

PCM 按以下的顺序进行。

① 采样：按一定的周期对原信号波形进行测量，即采集信号值的样本。采样频率必须是原信号最高频率的 2 倍以上。

② 量化：将样本脉冲的幅度采用进位或舍尾的办法变成量化间隔的整量值。

③ 编码：将量化后的值变换成二进制码，每个码位上都只对应着脉冲的有无。

8　光通信

要　点

光通信是把电信号变换成光强度来进行传送的通信方式，是一种由于光纤、半导体激光器、发光二极管等技术的开发成功而得以实现的通信技术。

解　释

光通信原理

光通信的原理可以用图 8.21 来表示。发送端的电信号由发光元件变换成光信号（E/O 变换）后沿着光纤传播，接收端由受光元件再把这种光信号变换回电信号（O/E 变换）。发光元件有发光二极管（LED）和激光二极管（LD），受光元件有雪崩光电二极管（APD）、PIN 光电二极管等。

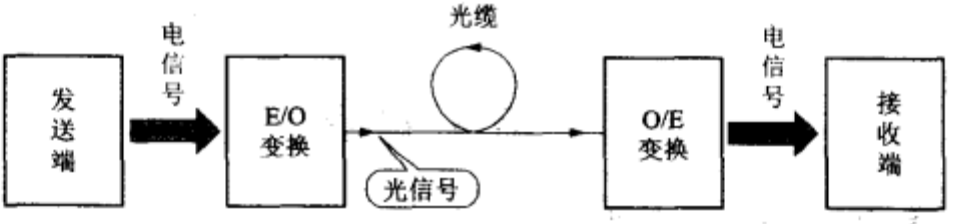


图 8.21　光通信原理

激光振荡

图 8.22 所示是激光振荡的原理。激光二极管的结构与 PN 结二极管相同，当加上电信号时，由于载流子复合而发光（复合时自然发光），该光进而因受激发射而被放大成为更强的光，这些被放大的光经反射镜多次反射，光强度越来越

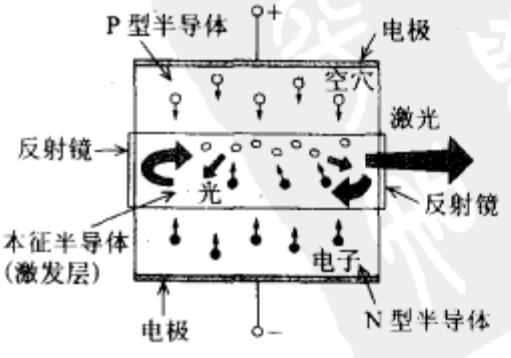


图 8.22　激光振荡原理

大，最终形成强振荡的激光。

光 缆

光纤的原理是英国物理学家廷德尔于 1854 年从光线能在从木桶中流出的水柱与空气的分界面里面全反射前进的现象发现的。

芯线
被覆层

如图 8.23(a)所示，光纤的中心是折射率大的**芯线**(core)，芯线周围是折射率小的同心圆状**被覆层**(clad)。

如图 8.23(b)所示，当光以大于临界角的方向入射到芯线上时，就在芯线与被覆层的界面上不断地产生全反射，从而以密闭状态在芯线内部向前传播。

单模 多模

按照光的传播方式，光纤分为**单模**和**多模**两种。

单模是传送单一信号的模式，材料可采用玻璃光纤，它的传送速度高，距离长，多用于基干网；多模是传送多个信号的模式，材料可采用塑料光纤，它适合于较短距离且低速传送，多用于局域网(LAN)。

光纤通常按其材料分为石英系光纤、多成分玻璃光纤及塑料光纤。

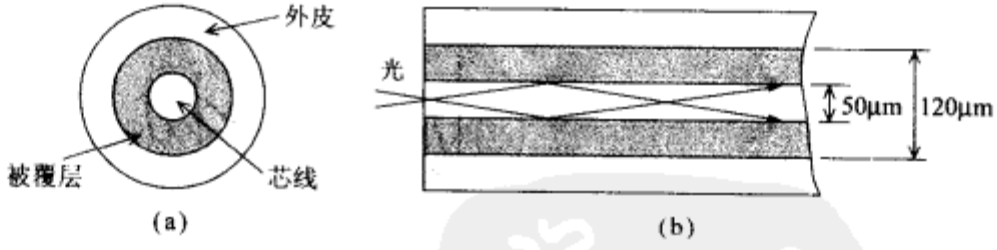


图 8.23 光纤的结构

光缆的特点

光缆的特点是：

① 传输损耗小，适合于长距离传送。

② 频带宽，传送容量大。

③ 是电的绝缘体，不受电磁感应影响。

④ 光信号被密封在光纤中，无串话。

⑤ 质量轻，柔性好。

9　电波的性质及传播方式

要　点

方向和大小随时间作周期性变化的电学量称为交流电，其变化的一次重复称为一个周期，每秒的周期数称为频率，频率的单位用 Hz 表示。日本电波法中把 300×10^4MHz (3000GHz)以下的电磁波称为电波。

解　释

□ 电　波

电波以与光速(3×10^8m/s)相同的速度在空间传播，传播速度除以频率就是电波一个周期传播的距离，称为波长，用字母 λ 表示。如图 8.24 所示，电波以其电场与磁通量相互正交的形式向前传播，波长越短，传播越具有直线性，越接近光的性质。长波段的电波以地面波形式传播，短波段的电波主要以地面波和电离层反射波传播，频率在超短波段以上的电波以直接波和地面反射波形式传播。

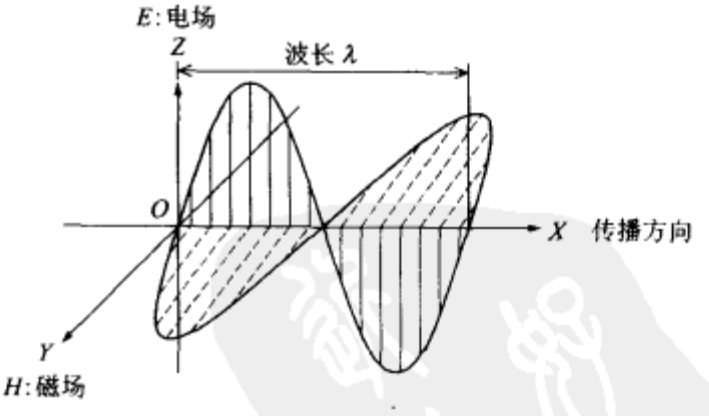


图 8.24　电波的磁通量与电场

□ 电波的分类

电波都对应着一定的波长或频率，一定频率范围内的电波具有相似的性质。表 8.1 所示为按波长或频率进行的分类。

表 8.1 电波的分类

频带划分及符号	频率范围
长波(LF)	30～300kHz
中波(MF)	300～3000kHz
短波(HF)	3～30MHz
超短波(VHF)	30～300MHz
甚短波(UHF)	300～3000MHz

电离层

地球大气层高空 70～300km 的地方，气体分子受到来自太阳的紫外线、X 射线等宇宙射线的作用而电离成为电子和离子，这就是电离层。电离层主要对短波以下的电波产生反射、吸收和折射作用。电离层的状态随昼夜、季节、太阳黑子活动周期及纬度的不同而变化。白天，电离层由 D、E、F_1、F_2 层构成；夜间，D 层消失，F_1 和 F_2 层变为一体化的 F 层。下面是电波的传播方式和特点。

长波(LF)

• **长波(LF)** 它的地面波传播距离长，电离层中的 D 层和 E 层也对它有反射作用，故可传到很远的地方。

中波(MF)

• **中波(MF)** 它的地面波传播距离比长波的短，电离层中的 E 层也对它有反射作用。白天由于 D 层对其衰减很大，故只能达到地面波的传播范围。夜间 D 层消失，故可传播到很远的地方。

短波(HF)

• **短波(HF)** 它的地面波能到达的距离比中波更短，但能通过 F 层与地面之间多次反射传播到远方。

超短波(VHF)
甚短波(UHF)

• **超短波(VHF)和甚短波(UHF)** 由于它能穿过电离层，所以不可能利用电离层反射来传播，传播距离基本上为视距范围，即直接波和地面反射波的传播范围。

微波

• **微波** 是指 UHF 以上的频率，它与光的性质相近，具有直线传播的性质，直接波是其主要传播方式。由于波长短，所以下雨、下雪及大雾都会造成电波衰减。反射板或地形对微波的反射或绕射也能用于通信。

图 8.25 示出了电离层的构成和不同频率电波的传播方式。

相关知识

◆ 异常传播

不按正常传播路径的传播称为异常传播，它会对通信造成不良影响。下面是一些典型的异常传播现象。

① 磁暴：因太阳磁力线出现异常而影响到整个电离层发生变化，造成全球范围内数日间无法进行短波通信。

② 德林格尔现象：受太阳紫外线影响，数分钟至数小时内半个地球不能进行短波通信。

③ E 电离层散射：夏季里，E 电离层的高度上产生能反射超短波的电离层，使超短波波段电波的传播距离增大，结果给通常的通信带来妨害。

④ 大气波导现象：伴随着气象状况的变化，大气的折射率发生了变化，大气层中形成了能使微波段电波通过的通道，使电波传播超出了通常的传播范围。

⑤ 涨落现象：两条以上不同路径的电波在接收地点上合成，由于其相位和强度不同，接收到的电波要么强度产生变化要么信号产生失真。

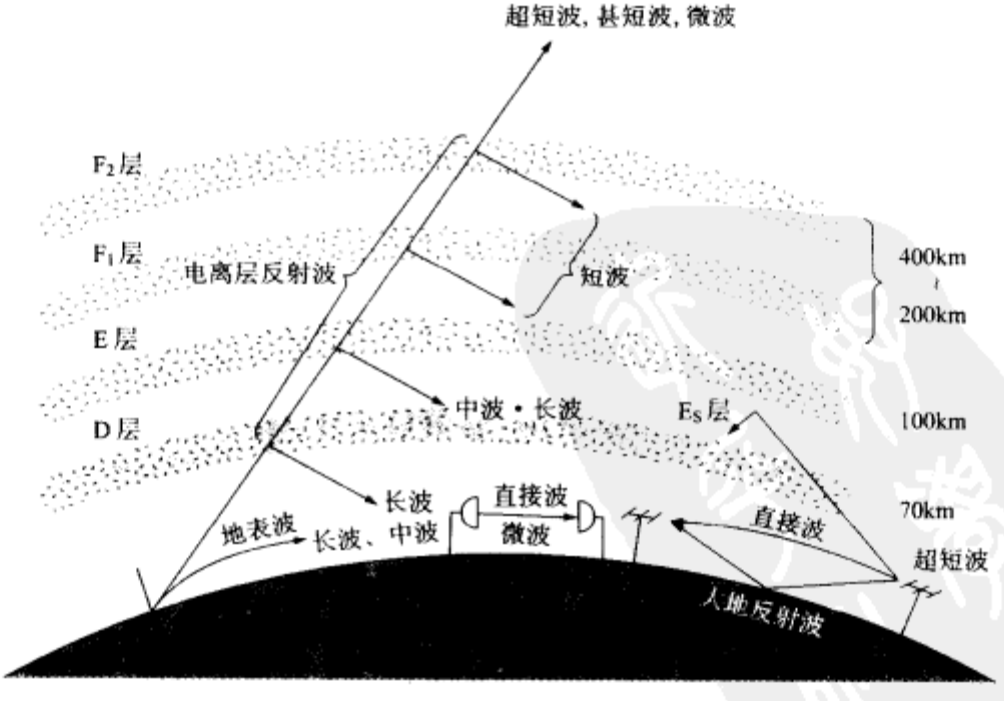


图 8.25　电离层的结构和电波的传播方式

◆ **标准电波与 JJY**

这里所说的标准电波指的是由日本信息通信研究机构所发射的日本标准时间(JST)电波信号，由于其呼号为 JJY，所以也称为 JJY。日本的标准时间是基于时间和频率的标准及公制世界时间(UTC)制定的。

◆ **电波钟**

电波钟是一种用脉宽编码所传送的报时信息，在日本，它是利用从福岛县大方度山所发射的 40kHz 长波标准电波和从佐贺县钢山所发射的 60kHz 长波标准电波来报时的。

10　发射机和接收机

要　点

能将声音、图像、计算机数据等信号变为已调制的电波或光波并发射出去的装置叫做发射机。从接收到的载波解调(检波)出原来信号的装置叫做接收机。

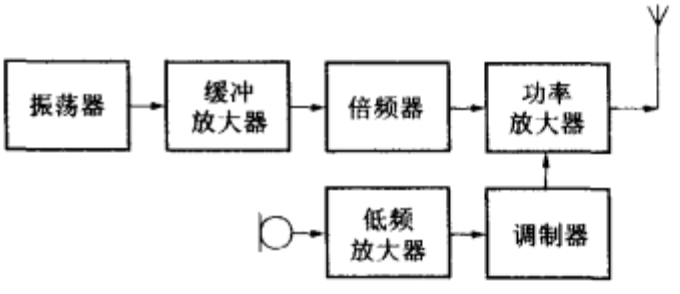
解　释

振荡器　倍频器
调制器
功率放大器

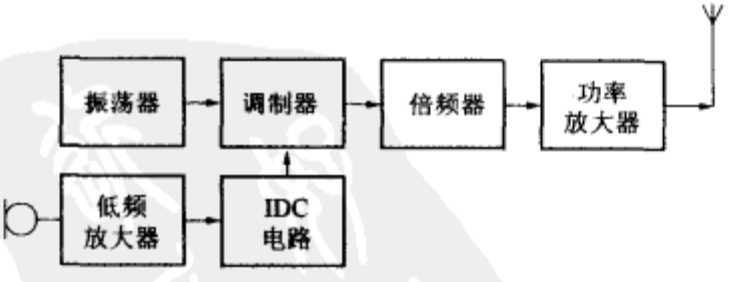
发射机的构造和性能

发射机由产生基准频率的**振荡器**、提高频率的**倍频器**、把信号调制到载波上的**调制器**和**功率放大器**组成。

对发射机性能的要求有频率准确稳定、寄生发射少、占有频带足够窄、能达到所需的发射功率等。图 8.26 示出 AM 发射机和 FM 发射机的构成。



(a) AM发射机的构成



(b) FM发射机的构成

图 8.26　发射机的构成

频率调制(FM)与 IDC 电路

频率调制就是用信号的振幅改变载波的频率。当信号振幅变大时，频率偏移增大，占有频带变宽。因此，常用 IDC(瞬时频偏限制)电路将频率偏移限制在一定的范围内。调频信号的频谱比较复杂。

接收机的构成和性能

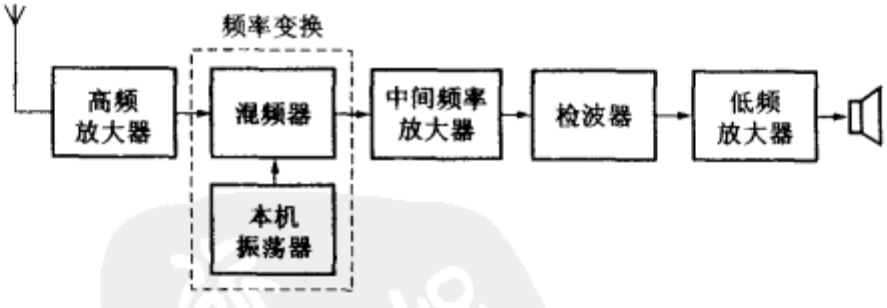
直接高频放大式
超外差式

接收机的构成有图 8.27(a)所示的**直接高频放大式**和图 8.27(b)所示的**超外差式**两类。直接高频放大式接收机是对收到的电波直接加以放大后再进行检波和低频放大，超短波以下的频段很少采用；超外差式接收机是把收到的电波先变成称为中间频率的较低频率，然后进行中频放大和检波，因而灵敏度高，选择性好。

接收机的性能指标有：灵敏度(接收机可能接收到的电波的强度)、选择性(接收机选择想要接收电台的能力)、稳定性(接收机长时间稳定地接收具有一定频率和一定强度的电波的能力)、保真度(接收机忠实再现所接收信号的能力)和内部噪声(越小越好)等。



(a) 直接高频放大式接收机



(b) 超外差式接收机

图 8.27　接收机的构成

调幅波的解调(检波)

线性检波
平方律检波

双边带调幅波的检波方式有两种，一种是二极管**线性检波**，其输出电流与输入电压呈线性关系；另一种是二极管**平方律检波**，其输出电流与输入电压的平方成比例。单边带调幅波的解调是通过环形解调器把本机振荡器的输出频率混合到检波器中从而得到声频分量的。

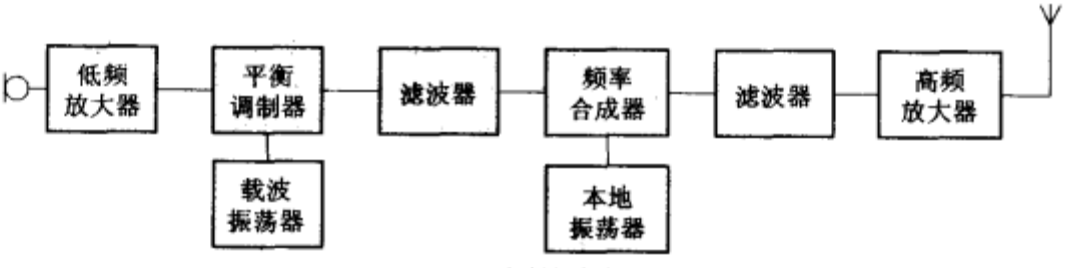
调频波的解调(鉴频)

频率鉴别器

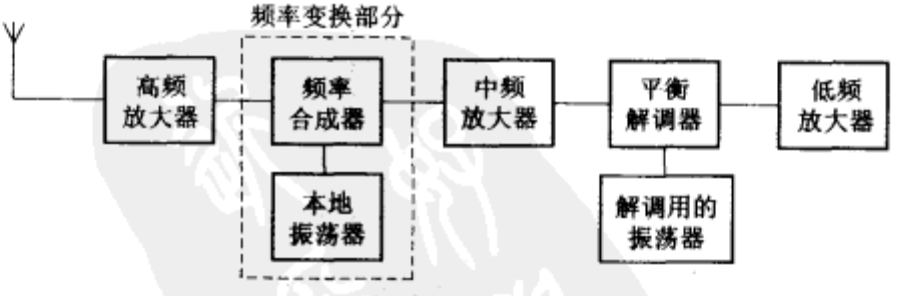
调频波的解调是先用限幅器使调频波的振幅保持恒定，然后将频率的变化变成电压幅度的变化，称之为**频率鉴别器**或简称鉴频器。鉴频器有比例鉴频电路和福斯特-西利鉴频电路等不同的电路形式，福斯特-西利鉴频电路能得到比比例鉴频电路大一倍的鉴频输出。

SSB 发射机和接收机的构成

由于 SSB 波中的载波被抑制掉了，所以，在发射机中要采用频率合成器和本地振荡器重新把频率提高，而在接收机中则要给平衡解调器接上解调所用的振荡器，才能解调出原信号。图 8.28 所示为 SSB 发射机和 SSB 接收机的构成框图，图 8.29 所示为既可用于平衡调制也可用于平衡解调的电路。



(a) SSB发射机的构成



(b) SSB接收机的构成

图 8.28　SSB 发射机和 SSB 接收机的构成框图

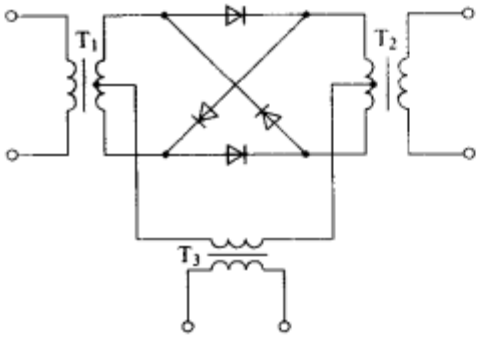


图 8.29　平衡调制解调电路

相关知识

◆ 无线电台

无线电台是关于无线设备的运行、管理、操作的机构，但不包括只以接收电波为目的的设备和活动。依据用途和目的，无线电台分为地面台、移动台、便携台、船用台、特种台、实验台、业余台等。

11　天线与馈线

要　点

天线是向空间发射电波或从空间接收电波的装置。电波具有波的性质，它能在长度等于 $\lambda/2$ 的导体中产生共振。天线辐射电波的特性具有某种方向性，半波长天线的方向性呈纺锤形，$\lambda/4$接地天线没有方向性。辐射电波在某个特定方向上较强的天线称为方向性天线，八木-宇田天线和抛物面天线都是方向性天线。

解　释

□ 天线的工作原理

图 8.30 所示是天线辐射电波的情形。当给半波长天线导体的中点加上高频电流(电压)时，导体上就会有高速往复运动的正电荷和负电荷。电荷移动产生电力线和与之正交的磁力线。于是，伴随着电荷的往复运动，电力线和磁力线便成为闭合曲线而被推挤到空间中去。

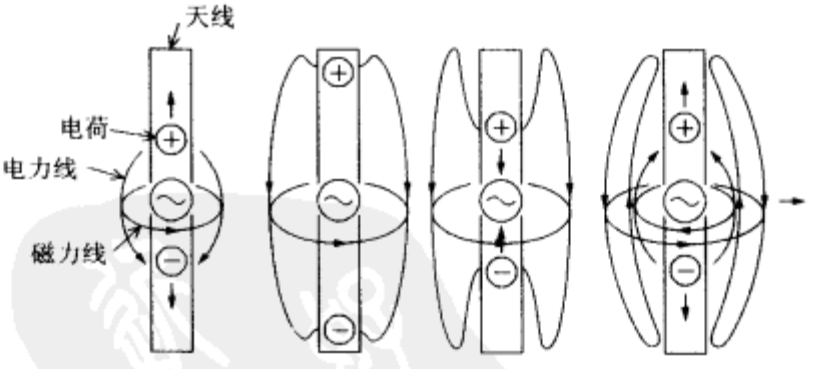


图 8.30　天线发出电波的情形

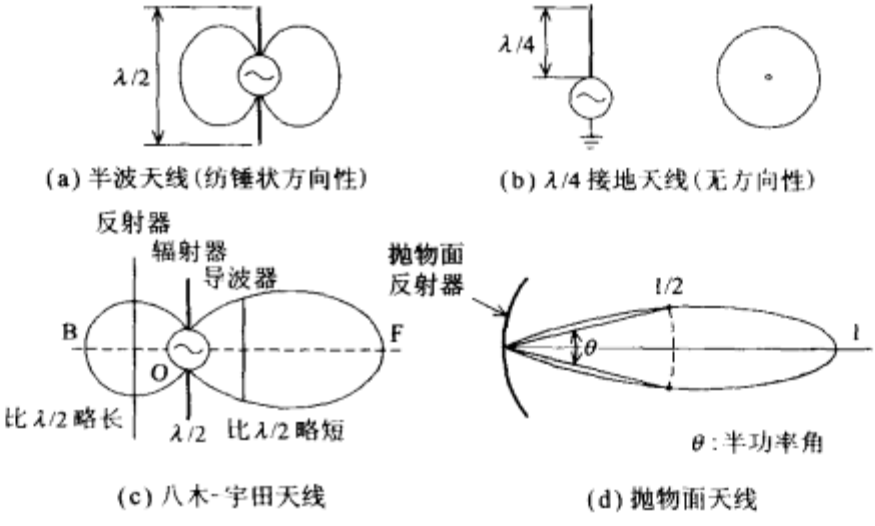
□ 天线的种类和方向性

半波长天线
λ/4 接地天线
八木-宇田天线

图 8.31(a)示出**半波长天线**的方向性，图 8.31(b)示出**λ/4 接地天线**的方向性。

图 8.31(c)所示的**八木-宇田天线**是在半波天线的前方增设了一个称为导波器的略短于 $\lambda/2$ 的导体，后方增设了一个称为反射器的略长于 $\lambda/2$ 的导体而构成的，具有指向导波器前方的方向性。

抛物面天线　图 8.31(d)所示的**抛物面天线**能把电波收集到抛物面的焦点上，多用于微波波段。它具有尖锐的方向性，但缺点是对于较长的波长，天线体积太大。



(a) 半波天线(纺锤状方向性)　(b) λ/4 接地天线(无方向性)

(c) 八木-宇田天线　(d) 抛物面天线

图 8.31　各种天线及其方向性

相关知识

◆ 极化波

电波在传播过程中磁通量始终与电场正交。电场方向与地面平行的电波称水平极化波，与地面垂直的称为垂直极化波。由水平极化波与垂直极化波相组合所形成的电场和磁通量边旋转边向前传播的电波，称为圆极化波。圆极化波又有左旋圆极化波和右旋圆极化波之分。

◆ 等效长度和等效高度

当用频率等于天线谐振频率的高频信号激励半波长天线时，天线上将产生如图 8.32 所示的正弦状驻波电流。若将其等效为图 8.32 所示的均匀分布电流，则其等效长度在半波长天线中称为等效长度(l_e)，在 $\lambda/4$ 接地天线中称为等效高度(h_e)。设半波长($\lambda/2$)为 l，$\lambda/4$ 为 h，则 l_e 和 h_e 可由式(8.2)、式(8.3)两式算出：

$$l_e = 2l/\pi = 0.64l \tag{8.2}$$

$$h_e = 2h/\pi = 0.32h \tag{8.3}$$

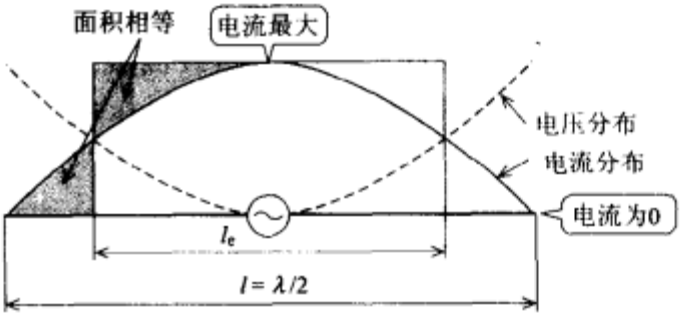


图 8.32　电压、电流分布与等效长度

电场强度

电场强度

设天线等效长度每米上的感应电压为 1μV/m，以此作为基准，用 dB 来表示电场 $E(\mu V/m)$，称之为**电场强度**，其表达式为

$$20\lg\frac{E\ (\mu V/m)}{1\ (\mu V/m)}=20\lg E\ (dB) \tag{8.4}$$

馈线的种类及特征阻抗

发射机和接收机都要用馈线与天线连接。馈线必须与天线阻抗相匹配。半波天线的阻抗为 73.13Ω，λ/4 接地天线的阻抗为 36.6Ω。图 8.33 示出馈线的形状与特征阻抗的关系。

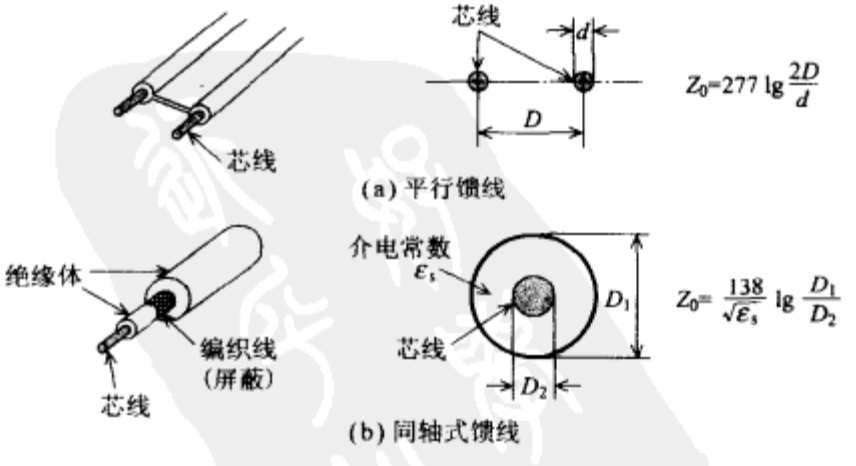


图 8.33　馈线的形状和特征阻抗

天线性能用语

半功率角

• **半功率角**　在天线的方向性中，设最大辐射方向上的功率密度为 1，则辐射功率密度为 1/2 的两个方向之间的

夹角 θ 就是半功率角。半功率角的值越小，表明天线的方向性越强(见图 8.31(d))。

F/B

• ***F/B*** 它是定向天线的前方电场强度与后方电场强度之比 (front to back ratio) (见图 8.31(c))。

$$F/B=20\ \lg\frac{\text{OF(前方电场强度)}}{\text{OB(后方电场强度)}}\ (\text{dB}) \qquad (8.5)$$

增益

• **增益** 一般是指待测天线与标准天线所发射的电波，在离天线一定距离的某点上产生相同电场强度所需要的天线功率之比。其中的标准天线经常由半波天线来担当。

$$G=10\ \lg\frac{\text{标准天线的输入功率 } P_i}{\text{待测天线的输入功率 } P}\ (\text{dB}) \qquad (8.6)$$

波导管

微波设备中，天线与发射机之间不是用馈线连接，采用的是具有图 8.34 所示结构的波导管，它能传送截止波长 $\lambda_c=2a$ 以下的电波。

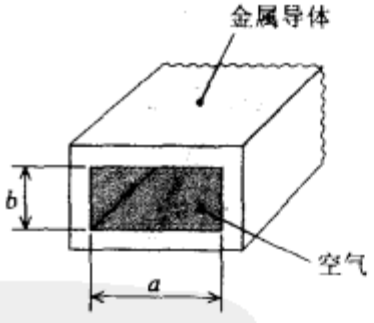


图 8.34 波导管的截面

天线与馈线的匹配

同轴式馈线的传输线路中，需要在天线与馈线之间设置匹配电路，以保证线路上只传送行波。如果不进行匹配的话，就会产生驻波，它会妨碍行波的传送。馈线与天线的匹配程度可用下式的驻波比(SWR)来表示，驻波比越接近 1，表明匹配得越好。一般情况下，当驻波比小于 1.5 时，实用上就不会有什么大问题。

$$\text{SWR}=\frac{1+\sqrt{P_r/P_f}}{1-\sqrt{P_r/P_f}}$$

式中，P_f 为行波功率；P_r 为反射方向上的功率。

12　微波通信

要　点

微波一般是指频率在 UHF 波段以上的电波，并无严格定义。微波的波长较短，与光的性质相近，具有直线传播特性，能穿过电离层而不被反射。以视距传输为主，长距离通信需要用中继站。不易受外来噪声影响，但下雨、下雪时衰减很大，也容易受建筑物和地形的影响。

解　释

视　距

微波的传输距离仅限于视距，其距离 D 可用式(8.7)来计算。长距离传输中必须每 30～50km 设一中继站。图 8.35 所示为微波通信的例子。

$$D \approx 4.12(\sqrt{h_t}+\sqrt{h_r})(\text{km}) \tag{8.7}$$

式中，h_t 为发送天线高度(m)；h_r 为接收天线高度(m)。

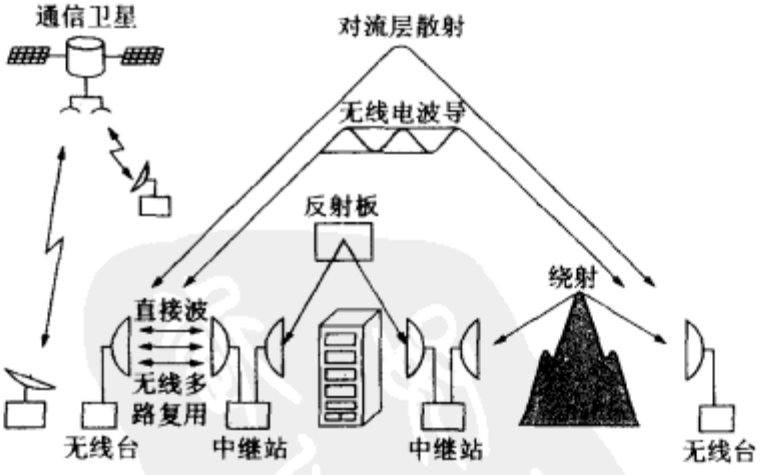


图 8.35　微波通信

中继方式

外差中继方式

• **外差中继方式**　是将接收到的微波信号变换成中间频率并进行放大，然后再变换成微波发送出去的方式。

检波(再生)中继方式

• **检波(再生)中继方式**　是将接收到的微波通过检波恢复成原信号，然后再用所恢复的原信号对微波进行调制后发射出去的方式。

直接中继方式

• **直接中继方式** 直接将接收到的微波加以放大(不经过中间频率变换)后发射出去的方式。

无电源中继方式

• **无电源中继方式** 是用反射板或者把收、发天线直接连起来进行中继的方式。

视距以外的传输

对流层散射通信

当微波通过对流层时,一部分能量产生散射现象,利用这一现象可进行**对流层散射通信**,目前已经实用化。此外,大气折射率变化会形成无线电波导,利用这一现象也能使电波传播到视距以外的地方。

相关知识

◆ 微波振荡

微波振荡中,既有用半导体管的,也有用电子管的。半导体管中,雪崩二极管输出功率大;耿氏二极管虽然输出功率小,但噪声小。电子管中,常用的是磁控管。如图 8.36 所示,磁控管的电极结构是阴极被一圈谐振腔所包围,谐振腔起着与 L 和 C 相同的作用,阴极发出的电子受磁通量力的作用在腔体中旋转而感应出微波。磁控管虽然振荡频率范围小,但管体小,输出功率大。

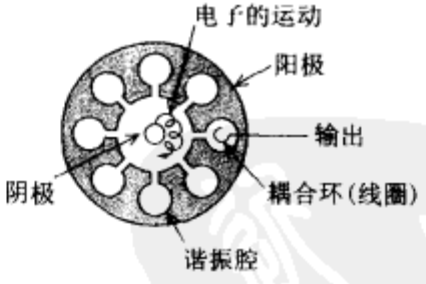


图 8.36 磁控管的电极

题外话

命运之神曾经对马可尼通信的频率微笑

意大利人马可尼(Guglielmo Marconi,1874～1937)是1909年诺贝尔物理学奖获得者,他曾发明了利用无线电波进行通信的装置,成功地实现了跨越大西洋的无线电荷量信,为通信事业的实用化作出了突出贡献。

赫兹的电波实验成功时,所产生的频率属于现在所说的VHF频段(超短波)或者UHF波段(极超短波),因而,他确认电波像光一样具有直线传播、反射和折射等性质。然而,马可尼在通信中所使用的电波频率却是现在所说的LF波段(长波)。

正是由于马可尼采用的是长波电波,因而才能够隔着大西洋在加拿大收到从英国所发射的电波。如果马可尼当时使用的是赫兹做实验时的那种超短波电波的话,什么时候才能捕捉到电波可就难说了。

13　卫星通信

要　点

卫星通信是指利用在赤道上空 35 800km 轨道上与地球同步旋转的静止卫星或绕地球转动的轨道卫星(非同步)作为中继站来进行的通信。通信卫星有两类,一类是被动卫星,它只能直接把地面站发来的电波反射回地面;另一类是主动卫星,上面安装着一种称为脉冲转发器的卫星中继器,由它对来自地面站的电波进行频率变换并加以放大后再重新发射回地面。

解　释

静止卫星与轨道卫星

如图 8.37 所示,通信卫星有静止卫星和轨道(非同步)卫星之分。由于静止卫星是在赤道上空 35 800km 的高度上与地球自转同步地旋转着,因而从地球上看去,它处于静止不动的状态,并且能够由三颗卫星实现与地球上任何地方同时通信。轨道非同步卫星的旋转与地球自转无关,它是通过把数据暂时存放在卫星上来利用一颗卫星实现与世界各地通信的,由于卫星所处位置的关系,因而使用时间是受到限制的。从地球往卫星上通信时称为**上行链接**,从卫星往地球上通信时称为**下行链接**。卫星通信的优点是能够同时把同一内容的信息传给范围广阔的区域,但也有由于电波在地球与卫星之间往复传播而产生延时的缺点。卫星通信所采用的电波频率为 1～10GHz,属于微波波段,一般称其为电波窗口。从地球上发射到卫星上的电波,要经过称为脉冲转发

上行链接
下行链接

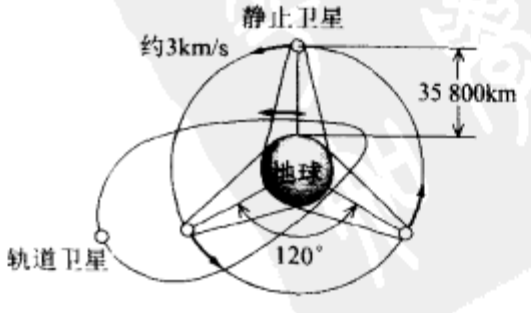


图 8.37　静止卫星和轨道卫星

器的卫星中继器进行频率变换和功率放大后重新发回地球，才能实现地球上两个地方之间的通信。

□ 脉冲转发器(卫星中继器)

脉冲转发器由接收机、频率变换器和功率放大器构成。由于卫星上的电源是太阳能电池，所以不可能发射像地面站那样大的功率，为此，需要与天线配合来获得所要求的增益。

相关知识

◆ 各种卫星通信系统

① INTELSAT：意思是国际商用通信卫星机构，是利用通信卫星向全世界提供电话线路和电视传输等通信服务的卫星通信系统。

② INMARSAT：意思是国际海事卫星机构，是利用通信卫星对船舶和飞机等移动体提供电话线路、电报线路、高速数据线路的卫星通信系统。

③ VSAT：是采用直径约 2m 的小型抛物面天线，经由空间站(卫星)进行各种通信的系统。它由监控线路的 VSAT 地面控制站和使用线路的 VSAT 地面站组成。

此外，还有许多其他利用卫星来进行各种通信业务的系统，如用于勘察地球资源的 LANDSAT 测地卫星和“向日葵”气象卫星等。

◆ 卫星蚀

春分和秋分前后，太阳、地球、人造卫星位于一条直线上，太阳光被地球遮挡，人造卫星的太阳能电池板上没有阳光照射，称之为卫星蚀，这段时间里无法进行通信。

题外话

麦克斯韦用数学预言了电波的存在

电波在空间一瞬间便传到了远方，这种情形与光一样，的确可以认为是自然现象。但就电波的发现过程而言，它却与普通自然现象的发现过程有所不同。

实际上，麦克斯韦(James Clerk Maxwell，1831～1879)早就用数学的方法预言了电波的存在，但经过了20年之后，赫兹才用实验的方法产生出了实际的电波。麦克斯韦预言电波存在的依据是法拉第关于给空间赋予电力线和磁力线的思想。法拉第着眼于电力线和磁力线的变化，发现了电磁感应定律，促成了发电机的发明，但他没有从数学上进行解析。

麦克斯韦把法拉第的这个了不起的思想总结成为四个数学表达式，并通过对方程式的求解于1864年预言了电波的存在。他根据这些方程式得出了一个非常重要的结论，那就是，无论是电力线还是磁力线，只要有一个发生了变化，就必然会产生相互交链着的电场和磁通量的变化，并作为电磁波而在空间中传播开来。

14　数据通信的机制与控制顺序

要　点

数据通信中，为了正确地发送和接收数据，通信双方要设定通信协议。通信协议包括传输方式和传输控制顺序。传输方式有串行通信方式和并行通信方式，传输控制顺序有 BSC 顺序和 HDLC 顺序等。

解　释

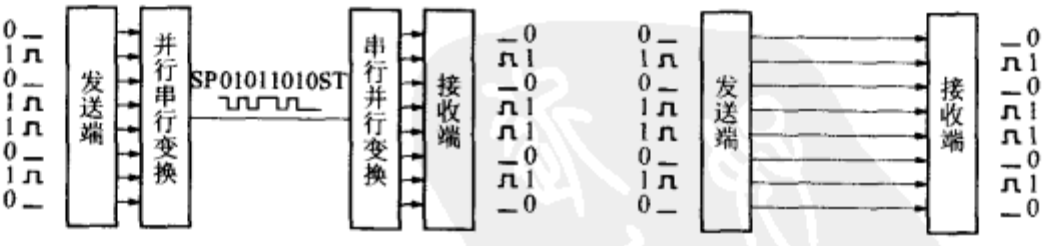
通信协议

通信协议是为进行通信而制定的规则，它决定了通信双方在进行数据通信时应该遵循的顺序和结构。

传输方式

图 8.38(a)所示为串行通信的数据传送方式，连接发送端与接收端的传输线路是一根线，传输线路上的数据是 1bit 接 1bit 地传送的。这种方式的特点是物理上的连线少，易于设计。

图 8.38(b)所示为并行通信的数据传送方式，连接发送端与接收端的传输线路是多根线，传输线路上同时有多个 bit 在并行传送。这种方式的特点是速度快，主要用于计算机内部及计算机与外部设备之间的数据传送。



(a) 串行通信方式　　(b) 并行通信方式

图 8.38　数据通信方式

传输控制顺序

在进行数据通信的时候，需要对同步方式及传送时的错误加以控制，传输控制顺序就是这方面的规则。

BSC 顺序

BSC 顺序是依据 IBM 的 BSC 顺序(Binary Synchronous Communications)确定的，同步所用的代码和确认响应所用

的传输控制字符如表 8.2 所示。数据的传送是以字段为单位进行的，字段的前头带有同步所用的 SYN 代码。这种方式称为 **SYN 同步方式**。

SYN 同步方式

表 8.2 传输控制字符

代 码	十六进制数码	功 能
SOH	01	数据头开始
ACK	06	肯定响应(正常)
STX	02	文本开始
DEL	10	传输控制扩展
ETX	03	文本结束
NAK	15	否定响应(异常)
EOT	04	传输结束
SYN	16	同步信号
ENQ	05	状态查询
ETB	17	传送数据段结束

条件方式

• **条件方式** 这种方式是由提出数据发送请求最早的一方担当主局角色来进行传输控制，也可称为先入为主方式。

查询/选择方式

查询

选择

• **查询/选择方式** 这种方式适用于 1 条线路上连接着多台终端的场合，是一种查询与选择相结合的方式。**查询**就是巡回式地对主机侧是否有向终端发送的数据进行确认，**选择**就是确认主机侧是否能接受终端的数据发送请求。

HDLC 顺序

HDLC 顺序是不同于 BSC 顺序的另一种顺序。BSC 顺序主要考虑的是“主机”与“终端”之间通信的需要，而 HDLC 主要考虑的是“计算机”与“计算机”之间通信的需要。HDLC 顺序对 BSC 顺序的缺点进行了改进，提高了其可靠性，适合于高速通信。HDLC 顺序的同步方式采用的是标志同步方式，如图 8.39 所示。

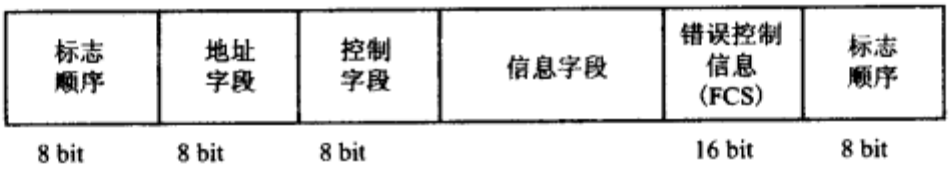


图 8.39　HDLC 顺序的帧结构示例

15 局域网(LAN)基础

要 点

以前，计算机多为单机应用和集中处理方式。随着计算机的普及，采用分散处理方式来提高工作效率的问题，变得重要起来。为了使分散处理的结果集约化，需要将多台计算机及其他设备结合起来构建成网络。这种计算机网络有局域网(LAN)、广域网(WAN)、互联网(internet)等各种不同的形式。

解 释

局域局

局域网(LAN：local Area Network)是指设置在同一建筑物或其他范围较窄场所、由计算机及其外部设备共同构成的网络系统。

局域网的连接方式

局域网的连接方式(拓扑)有总线形、环形及星形，如图 8.40 所示。

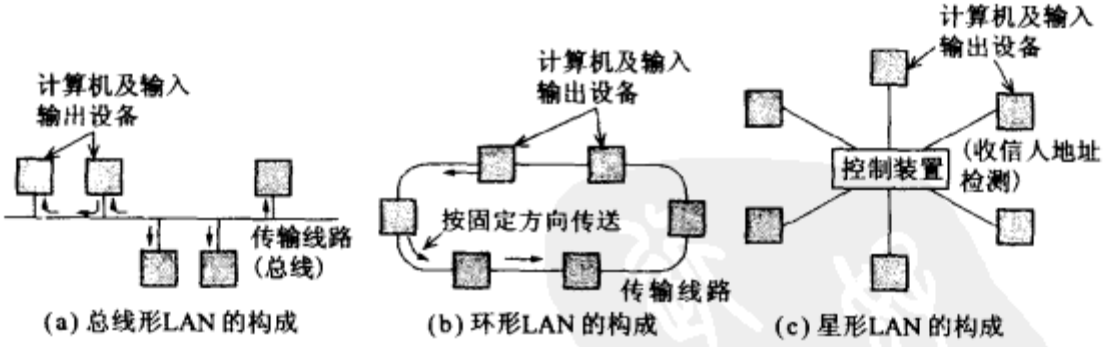


图 8.40 LAN 的方式

总线形连接方式

总线形连接方式的拓扑是所有的终端设备都随机地连接在一条干线上(见图 8.40(a))。这种方式的优点是终端装置出现故障时不会对网格总体造成影响，终端的增加或拆除也比较简单。其缺点是重新布局和扩展比较困难。其连接电缆多采用 10BASE-5 和 10BASE-2 等同轴电缆。

环形连接方式

环形连接方式的拓扑是终端设备顺着传输线路连成环形。这种方式在网络中某台终端发生故障时，有可能会造成整

个网络瘫痪，因而要有相应的解决措施。

星形连接方式

星形连接方式的拓扑是终端设备都连接在位于中央的控制装置上。控制装置多采用 HUB。其优点是终端设备的拆除和更换比较容易。电缆多采用 10BASE-T 等双绞线电缆。现在所建的局域网大多数都采用这种连接方式。

局域网的传输方式

局域网中，数据可以在多台计算机之间进行交换，为了使信号不至于在传输线路上发生冲突，就要对其加以控制。在局域网的通信方式中，能实现这种控制的方式有 CSMA/CD 方式和令牌方式等。

CSMA/CD 方式

CSMA/CD 方式是典型局域网规格“以太网”中所采用的数据存取控制方式，它是首先检测网上是否有数据正在流动，然后才发送数据的。当数据发生冲突时，就等待一会儿，接着再发一次。当网上有大量数据连续流动，或者正在存取数据的终端设备较多时，响应速度就会很慢，这是这种方式的缺点。星形连接和总线形连接的局域网多采用这种传输方式。

令牌方式

令牌方式就是网上有一个称为令牌的信号在流动，获得这个令牌的终端设备便得到了数据发送权。因为令牌只有一个，所以网上不会发生数据冲突的问题。环形连接和总线形连接的局域网多采用这种传输方式。

局域网的构成

局域网的构成可按终端设备的连接关系大致分为对等系统和客户机/服务器系统。

对等系统

对等系统的终端设备不具有预先确定好的主从关系，由于双方是相互直接相连的，因而它们都既是服务器，也是客户机。以个人计算机为主体的小规模局域网多采用这种系统。

客户机/服务器系统

客户机/服务器系统的终端设备具有预先确定好的主从关系，也就是说，客户机只能向服务器请求服务，而服务器则根据客户机的请求提供服务。典型的服务器有文件服务器和打印机服务器。文件服务器是按照客户机可以共享文件的原则对程序和文件进行一元化管理的，打印机服务器是根据客户机的打印请求提供打印服务的。

16 局域网的构成

要 点

要构成网络，就要有与网络用途相对应的设备。构成网络时要连接的机器有：用于构成局域网的集线器（HUB）；用于对信号进行放大的中继器；用于连接网络与网络的网桥、路由器、网关等。

解 释

局域网的构成设备

图 8.41 是含有局域网的网络结构。**集线器**（HUB）是用于构成局域网的集中连接装置，通过级联（瓜蔓式），可以连接更多的终端。

集线器

中继器是下一节表 8.3 中所示的基本参考模型第一层（即物理层）中的连接装置。当连接电缆过长时，电信号会因为被衰减而不能正常传送，中继器的作用就是对电信号进行放大，从而使电缆可以加长使用。

中继器

网桥是 OSI 基本参考模型第二层（即链路层）中的连接装置。它是局域网之间或者存取控制不同的 CSMA/CD 方式与令牌方式之间连接时，用来延长传输距离的设备。此外，它还具有通过 MAC 地址识别来判断数据的收件人地址的功能，从而能避免网络的混乱。

网桥

路由器是 OSI 基本参考模型第三层（即网络层）中的连接装置，是根据网络层的数据包上所带的 IP 地址来进行数据的中继和分配的装置。有效利用这种功能，能够起到**过滤**作用，把不需要的数据包阻止在网上。将其设置在连接互联网的地方，能够起到**防火墙**的作用，防止来自外部的不正当入侵。利用 IP 地址来选择通信路径的处理称为**路径选择**。

路由器

过滤

防火墙

路径选择

网关是 OSI 基本参考模型第七层（即应用层）中的连接装置。它能够通过协议变换连接网络结构不同的局域网。

网关

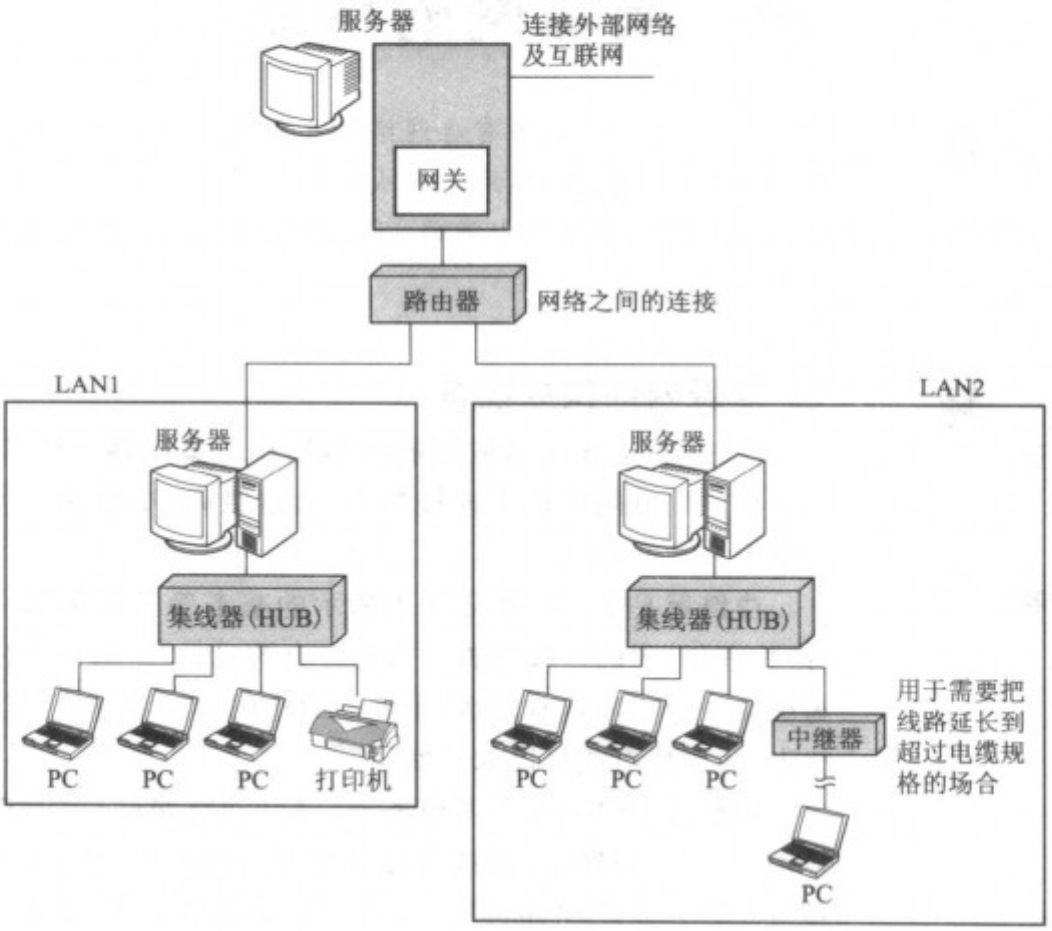


图 8.41　网络构成

相关知识

◆ 与互联网连接的技术

①xDSL(xdigital Subscriber Line)：它是一种利用普通电话线路来连接互联网的技术，即利用电话中所不用的高端频带来进行高速通信的方法。它的业务之一就是 ADSL，这里的字母 A 取自 Asymmetric 一词的第一个字母，Asymmetric 是不对称的意思，在这里的具体含义是上行和下行的通信速度不同，也就是说，上、下行通信速度不同是 ADSL 的特点。此外，还有上、下行通信速度相同的 SDSL 等许多连接方式的种类。

② CATV(Cable Television)：它是一种利用电缆电视的入户电缆来连接互联网的方法。

③ FTTH(Fiber To The Home)：它是把光缆一直拉到互联网用户的家里使之能进行高速通信的连接方法。

④ ISDN(Integrated Services Digital Network)：ISDN 与互联网的连接中，通过 DSU 发送和接收的信号是数字信号，通信速度最高可达到 128Kbit/s。

17　网络与协议

要　点

网络的结构采用了按所需功能将数据通信分为几个层次的模型。ISO(国际标准化机构)所给出的 OSI 基本参考模型是按照 7 层来分类定义的。

解　释

OSI 基本参考模型

表 8.3 是 OSI 基本参考模型，表 8.4 给出了 OSI 基本参考模型与 TCP/IP 协议群的对照。

表 8.3　OSI 基本参考模型

	层　次	名　称	功　能
上位层	第七层	应用层	规定应用服务的提供方法
	第六层	表示层	规定数据表示方法和表示数据
	第五层	会话层	规定同步调整和全双工等通信控制方式
下位层	第四层	传输层	设定通过的传输线路，规定终端对终端系统间的通信
	第三层	网络层	规定网络的路径选择功能和中继功能
	第二层	链路层	规定数据传送的方法
	第一层	物理层	规定电气方面的物理条件

表 8.4　OSI 基本参考模型与 TCP/IP 协议群的对照

OSI 基本参考模型	TCP/IP 协议群	
应用层	应用层	HTTP，FTP，SMTP，POP，DNS，telnet 等
表示层		
会话层		
传输层	传输层	TCP，UDP
网络层	网络层	IP
链路层	网络接口层	以太网，FDDI 等
物理层		

表 8.3 所示的下位层是用于物理连接和提高通信可靠性的协议群。上位层建立在下位层之上，提供各种通信服务。

TCP/IP

TCP/IP 是为了建立互联网上的通信而将 OSI 基本参考模型第四层(传输层)的 TCP 和第三层(网络层)的 IP 组合在一起所作成的协议。它可以进行高可靠性的通信。

IP

IP(Internet Protocol)提供可靠性低的非连接型服务。在 IP 协议中，指定各终端的 IP 地址被用于控制 IP 数据包到达目标终端设备之前的路径。

TCP

TCP(Transmission Control Protocol)用可靠性低的 IP 来实现可靠性高的通信，提供进行次序控制和流量控制的连接型服务。

UDP/IP

与此相反，**UDP/IP** 是可靠性不必像 TCP 那样高的场合下所使用的非连接型服务。与 TCP/IP 相比，UDP/IP 的可靠性低，但传输效率高。它适合于短时间内收、发可靠性要求不怎么高的数据。

应用层所提供的服务

HTTP

• **HTTP**(Hyper Text Transport Protocol) 它是收、发构成主页的超文本数据时所用的协议。URL 上所记述的由“http://”打头的地址就意味使用 HTTP。

FTP

• **FTP**(File Transfer Protocol) 它是用于实现网络中的文件传送的协议，计算机之间传送文件时要用到这个协议。

SMTP

• **SMTP**(Simple Mail Transfer Protocol) 它是用于向邮件服务器发送邮件的协议。

POP

• **POP**(Post Office Protocol) 它是用于从邮件服务器接收邮件的协议。

telnet

• **telnet** 它是在使用 TCP/IP 的网络中用来对远方计算机进行远程操作的协议。

DNS

• **DNS**(Domain Name System) 它是将域名与 IP 地址一一对应起来的一种服务。

18　IP 地址与子网掩膜

要　点

构建网络的时候，要给各个终端设备分配一个专用的 IP 地址；进而把网络与网络联起来构成大规模网络的时候，为了提高数据通信的效率，要进行路径选择；进行路径选择的时候，网络的地址要采用子网掩膜。

解　释

IP 地址

寄信的时候一定要写明投递地址，有了这个地址，信才能送到收信人的手中。与此同理，要在网上收、发数据，各终端设备也要有一个专用的地址，有了这个地址，终端之间才能进行数据交换。这种网上各终端设备专用的地址，就称为**IP 地址**。

IP 地址

IP 地址由 32bit 二进制数构成。这个由 0 和 1 构成的 32bit 二进制数，对于计算机来说，是非常方便的，而对于人来说，读起来就难了。为了使设定 IP 地址时不易出错，通常都采用如图 8.42 所示的表示方法，即把 32bit 二进制数按 8bit 分成 4 段，并将每段表示成十进制数。

11000000	10101000	00000001	00101010	…二进制数表示，便于计算机处理
192	168	1	42	…十进制数表示，便于人读、写

图 8.42　IP 地址

根据网络规模的具体情形，IP 地址有几个不同类别。主机地址不能采用全部为 0 和全部为 1 的地址，因为它们是个特别地址。

如图 8.43 所示，以 C 类 IP 地址为例来看，最上位是“110”，紧接着的是网络地址，其长度为 21bit。然后是主机地址，其长度为 8bit。这样，就构成了一个 32bit 的 IP 地址。网络地址可设定 $2^{21}=2\ 097\ 152$ 个，一个网络最多可连接 $2^8-2=254$ 台主机（计算机、打印机及其他设备）。

表 8.5 示出了 IP 地址的格式。

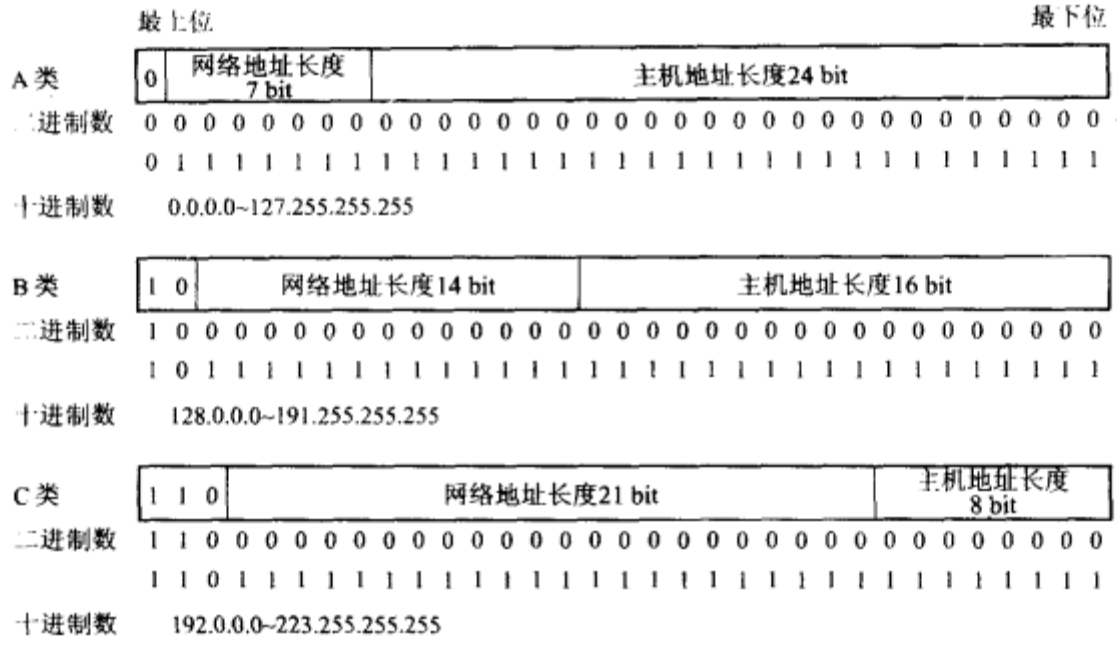


图 8.43 IP 地址与类别

表 8.5 IP 地址的格式

类型	最上位	网络地址	主机地址	主机台数	网络的规模
A 类	0	7bit	24bit	16 777 214 台	大规模
B 类	10	14bit	16bit	65 534 台	中规模
C 类	110	21bit	8bit	254 台	小规模

子网掩膜

子网掩膜是在把网络与网络连接起来进一步构成大规模网络时用来指定网络专用地址的。这时，网络地址是通过将 IP 地址和子网掩膜按逻辑 AND 予以计算而求得的(见图 8.44)。

IP 地址	11000000	10101000	00000001	00101010
	192 .	168 .	1 .	42
子网掩膜	11111111	11111111	11111111	00000000
	255 .	255 .	255 .	0
网络地址	11000000	10101000	00000001	00000000
	192 .	168 .	1 .	0

图 8.44 网络地址

19　通信及网络工作者的任职资格

要　点

通信和网络设备大都属于公共设施，它们在社会的各个领域中起着重要的作用。因此担当这些设备的维护、管理和运行的人，必须具备相应的知识和技术，并且要持有政府有关部门颁发的从业资格证书。

解　释

工程担当者资格

工程担当者是指担当通信线路终端设备或自营通信设备安装工作的人和担当工程监督工作的人。工程担当者必须具有工程担当者资格证书，资格证书的种类和允许从事的工程范围如表 8.6 所示。

表 8.6　工程担当者资格证书的种类和工程范围

第 1 种 AI 资格证	在模拟传输线路设备（输入、输出信号均为模拟信号的通信线路设备，下同）上连接终端设备等的工程及在综合数字通信设备[1]上连接终端设备等的工程
第 2 种 AI 资格证	在模拟传输线路设备上连接终端设备等的工程（仅限终端设备上所收纳的通信线路数目为 50 路以下及内部线路数目为 200 路以下者）及在综合数字通信设备上连接终端设备等的工程（仅限综合数字通信线路数目为 50 路（每秒 64Kbit 折算为 1 路）以下者
第 3 种 AI 资格证	在模拟传输线路设备上连接终端设备等的工程（仅限终端设备上所收纳的通信线路数目为 1 路者）及在综合数字通信设备上连接终端设备等的工程（仅限综合数字通信线路数目用基本接口连接 1 路者）
第 1 种 DD 资格证	在数字传输线路设备（输入、输出信号均为数字信号的通信线路设备，下同）上连接终端设备等的工程，但不包括在综合数字通信设备上连接终端设备等的工程
第 2 种 DD 资格证	在数字传输线路设备上连接终端设备等的工程（仅限连接点上数字信号输入、输出速度为每秒 100Mbit 以下者），但不包括在综合数字通信设备上连接终端设备等工程

续表 8.5

第 3 种 DD 资格证	在数字传输线路设备上连接终端设备的工程(仅限连接点上数字信号的输入、输出速度为每秒 100Mbit 以下且主要为连接互联网者),但不包括在综合数字通信设备上连接终端设备等的工程
AI/DD 综合资格证	在模拟传输线路设备及数字传输线路设备上连接终端设备等的工程

1)"综合数字通信设备"是指提供给通信事业经营者的通信线路设备,主要是以传输交换为目的的那些通信设备,即按照每秒 64Kbit 的单位数字信号传输速度把代码、语音、图像等各种数据信号综合到一起以达到能在线路上传输和交换的那些设备,也就是能满足 ISDN 传输交换要求的设备。

通信专业主任工程师资格

日本政府规定,"通信事业经营者必须依据总务省的法令,从持有政府有关部门所颁发的通信专业主任工程师资格证书的人当中,选拔主任工程师来监督所经营通信设备的工程、维护及运行方面的各种事项"。通信专业主任工程师资格证的种类及其监督的范围如表 8.6 所示。

表 8.6 通信专业主任工程师资格证的种类及监督范围

资格证的种类	监督范围
传输交换主任工程师资格证	供通信事业单位用的传输交换设备及这些设备的附属设备的工程、维护和使用
线路主任工程师资格证	供通信事业单位用的线路设备及这些设备的附属设备的工程、维护和使用

无线电工作者资格的审批

无线电工作者是指从事无线电设备操作或对其进行监督的人,担任监督工作的人称为主任无线电工作者,这类人要经过总务大臣的批准。根据所操作无线电设备的区别,无线电工作者有表 8.7 所示的种类。

表 8.7　无线电工作者的种类

综合无线电	一级综合无线电荷量信员	航空特种无线电	航空特种无线电技师
	二级综合无线电荷量信员	地面无线电	一级地面无线电技师
	三级综合无线电荷量信员		二级地面无线电技师
海上无线电	一级海上无线电荷量信员	地面特种无线电	一级地面特种无线电技师
	二级海上无线电荷量信员		二级地面特种无线电技师
	三级海上无线电荷量信员		三级地面特种无线电技师
	四级海上无线电荷量信员		国内电信级地面特种无线电技师
海上特种无线电	一级海上特种无线电技师	业余无线电	一级业余无线电技师
	二级海上特种无线电技师		二级业余无线电技师
	三级海上特种无线电技师		三级业余无线电技师
	雷达级海上特种无线电技师		四级业余无线电技师
航空无线电	航空无线电荷量信员		

第9章

声像设备

● 责任编委
海野良次
● 执　　笔
海野良次

从本章的标题即可知道，这里要介绍的是音响设备和图像设备方面的内容。

如果将这两方面合在一起考虑，那就是每天都带给人们快乐和信息的电视广播系统。从当初只要能既看到画面又听到声音就感到很满意的时代，走到了今天更加希望有临场感的时代。要实现这一愿望，电视信号最起码得从模拟处理转变为数字处理。数字信号经过传输线路后几乎没有什么失真，这是电视和通信设备的飞跃性发展，今后的课题将是进一步实现具有从模拟到数字又从数字到模拟功能的系统和如何进一步压缩数据量的问题。近年来，数字图像处理已经发展到了一般用户都能用数码相机和个人计算机来轻易处理的程度，这便是数字化技术进步促进了运算存储装置高性能化的具体例证。

本章将对音响设备、图像设备及电视(BS、CS及地面波数字电视)设备的原理和构造进行解说。

1　声音的性质与人的听觉

要　点

人耳所听到的声音是以空气密度变化的形式而传播的疏密波，它携带着一定的能量在空气中传播，这就是声波。

解　释

□ 声音的性质和传播速度

声波

物体振动时，与该物体接触的空气随之振动而产生**声波**。声波不能在真空中传播，但空气以外的气体、液体、固体都能传播声波。

空气中传播的声波如图 9.1 所示，它是作为前进方向上的空气压力变化以纵波（即疏密波）的形式扩展传播的。其

传播速度

传播速度（音速）因气温而异，设气温为 t(℃)，声波的**传播速度** v(m/s)可用式(9.1)表示，即

$$v=331.5+0.6t \ (\mathrm{m/s}) \tag{9.1}$$

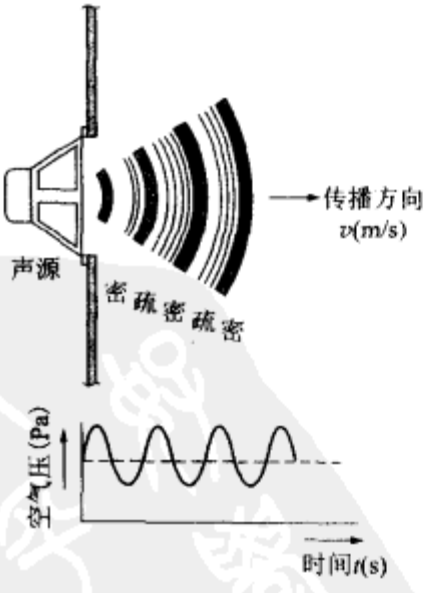


图 9.1　声波的传播方式

声波的频率 f(Hz)和波长 λ(m)的关系由式(9.2)表示，即

$$\lambda=\frac{v}{f} \ (\mathrm{m}) \tag{9.2}$$

声压和声压级

声压
声压级

当空气中的压力因声波而发生变化时，该压力的变化就称为**声压**。声压用其有效值 P 表示，P 的单位采用压力的单位 Pa(帕[斯卡])。由式(9.3)表示的声压值称为**声压级**，单位采用 dB(分贝)。

$$\mathrm{SPL}=20\lg\left(\frac{P}{P_0}\right)=20\lg\left(\frac{P}{20\times10^{-6}}\right)\ (\mathrm{dB}) \quad (9.3)$$

这里，P_0 为 20μPa，这个值是听觉正常的人能作为声音所感受到的最小声压，大致与 1000Hz 正弦波声音的最小可听值相对应。

人的听觉

最小可听值
最大可听值

人能听到的声音频率范围因声压大小和个人因素而有所差别，大体在 20Hz～20kHz 之间。人能作为声音感受到的声压级最小值称为**最小可听值**，其最大值称为**最大可听值**。声压级低于最小可听值时，人不能作为声音而感觉到，而超过最大可听值时，则会感到疼痛。图 9.2 是以频率为变量，用单频音声压级表示的人耳平均可听范围曲线，称为**等感曲线**。

等感曲线

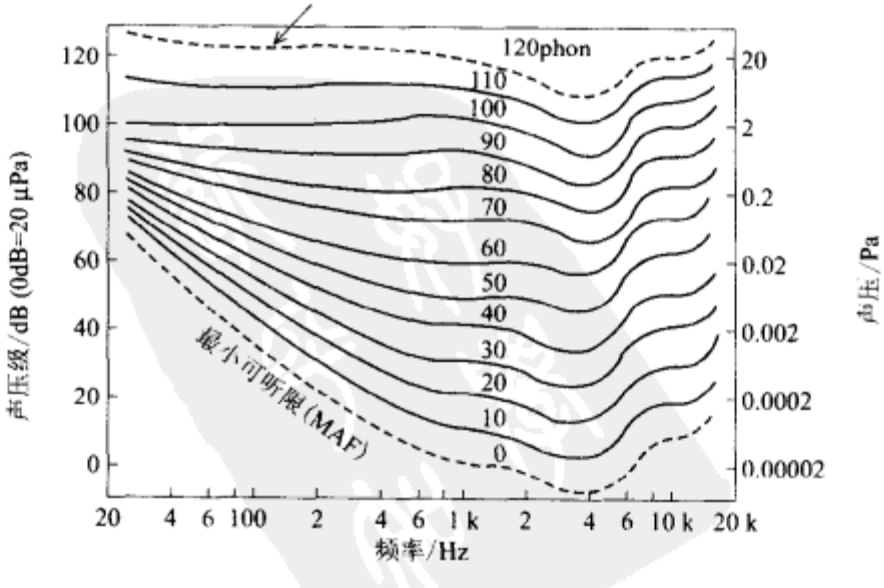


图 9.2　等感曲线

相关知识

◆ 骨传导

声音在人体内的传播途径有两种，一种是经过耳朵的鼓膜到达耳蜗的“气导声”；另一种是传过头盖骨之后到达耳蜗的“骨导声”，后者称为“骨传导”。据说，大音乐家贝多芬晚年的时候就是利用骨传导来听音的。现在的便携电话机中也应用了骨传导原理，这种电话机在通话中能够不受周围噪声的影响。

2　拾音器和扬声器

要　点

拾音器是把声音或音乐等声能变换成电信号的设备，扬声器是把电信号变换成声能的设备。

解　释

拾音器

拾音器依其原理和构造可分为很多种，特性也各不相同。其种类有电容式拾音器、电动式拾音器和应用了压电元件的晶体拾音器等。

电容式拾音器的构造和原理

如图 9.3 所示，电容式拾音器由可动电极（振动膜）和固定电极构成，可动电极能随着空气振动而振动。当电极间加有直流电压（200～300V）、可动电极因声压作用而振动时，电极间的电容就发生变化，积蓄在电极之间的电荷随之发生变化。这一变化作为电流流过负载电阻 R，输出端就得到了与声音大小相应的电信号。

与其他结构的拾音器相比，电容式拾音器有频率特性和音质好，噪声小等特点，因而常用作标准拾音器和广播电台使用的设备。

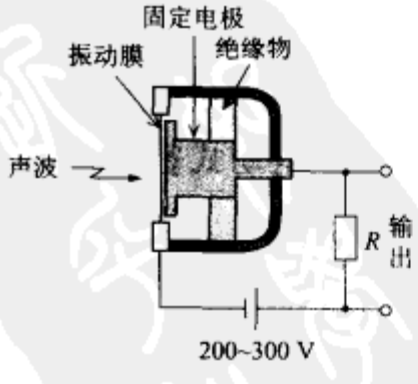


图 9.3　电容式拾音器

驻极体拾音器

驻极体拾音器的原理基本上与电容式拾音器相同，只是电极之间有一层永久带电的高分子膜（称为驻极体），因而它

不需要像电容式拾音器那样加直流高电压。图 9.4 是驻极体拾音器的构造。

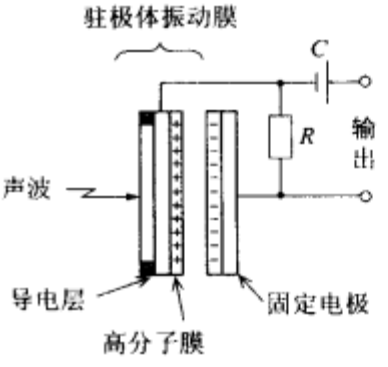


图 9.4　驻极体拾音器

电动式拾音器的构造和原理

电动式拾音器的构造是在永久磁铁的磁通量里置有一个可动线圈(音圈),音圈直接连在由硬铝薄膜等材料制成的振动膜上。当振动膜在声波作用下发生振动时,线圈中因电磁感应而产生电动势,于是声波就变成了电信号。这种拾音器的输出阻抗很低,只有几十欧,必要时要用变压器变换成600Ω或几十千欧。其特点是频率特性比较平坦、噪声小、受温度和湿度影响小,结构牢靠。

扬声器

按其工作原理可分为电动式、电磁式、压电式等各种类型。收音机、电视机、立体声等音响设备中,常采用频率特性和音质较好的电动式扬声器。

电动式扬声器的构造和原理

图 9.5 是电动式扬声器的构造。可动线圈位于强磁通量中,当声频电流流过时,线圈受弗莱明左手法则所产生的电磁力作用而前、后振动,使振动膜产生向空间传播的声音。为了提高扬声器的发声效率,必须防止空气压力向扬声器内侧蔓延,为此,一般要给扬声器配上机箱。

电容式扬声器

电容式扬声器在构造上与电容式拾音器基本上是一样的。它有两片较大的平行板电极,当该电极之间加有直流电

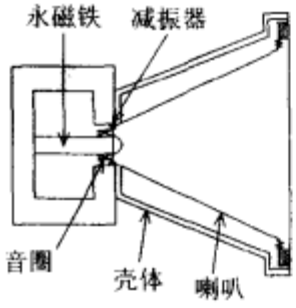


图 9.5 电动式扬声器

压(高电压)时,如果有音频信号电流流入,电极上的振动膜就会产生振动。电容式扬声器的抗振颤能力强,用作大厅等场所的扩音设备时,能得到均匀性好、明亮清晰的声音。

3　摄像器件

要　点

摄像器件是能够把图像的光信号变换成电信号的器件。

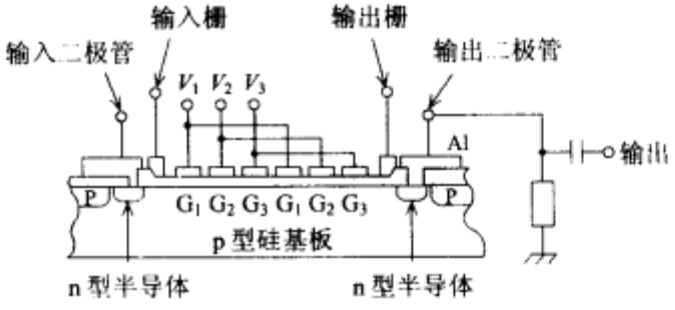
解　释

固体摄像器件

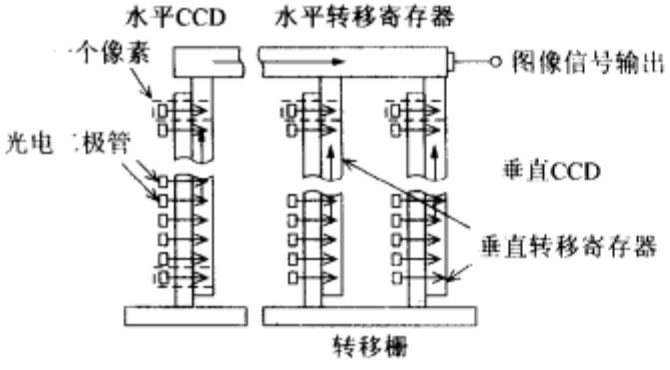
固体摄像器件中，CCD(Charge Coupled Device)型摄像器件和CMOS(Complementarg Metal-Oxide Semiconductor)图像传感器件是两种常用的摄像器件。这两种摄像器件的图像传感器中都有很多排列得非常整齐的光电二极管或光电三极管，每个管子就是一个光电变换单元，它代表一个像素。但它们不是作为通常的光电流输出型光电二极管或光电三极管来使用，而是作为光电流储蓄型(即把光能变成电荷后积累下来)来使用的。这种摄像器件能够在光照能量很小的情况下，通过电荷积累得到较高的输出电压，因而它具有噪声小和灵敏度高的优点。

图9.6(a)是CCD关于电荷转移的原理构造，当栅极电压依次从V_1切换到V_2、V_3时，积蓄在栅极下面的像素电荷就依次向G_2、G_3下面转移，CCD的输出端便得到了一连串按像素顺序先后输出的图像信号。图9.6(b)是CCD关于摄像器件的原理构造，光电二极管和CCD按纵横方向整齐地排列成面阵结构。当光电二极管受到光照时，其光电变换作用所产生的像素电荷便在垂直CCD的栅极下面储存下来。这样，只要用垂直CCD栅极电压把每条垂直线上的像素电荷按照水平线一行接一行地转移到水平CCD中去，接着再由水平CCD一个像素接一个像素地转移到输出端，便可将整幅图像的像素变成一连串的输出信号，这便是电视摄像机的图像扫描输出信号。

图9.7(a)是CMOS图像传感器的构造，它由光电二级管(PD)、放大部、读出栅极(Rd)、电荷检测部(FD)、复位栅极(Rst)及行选择开关构成。与CCD型摄像器件不同，CMOS



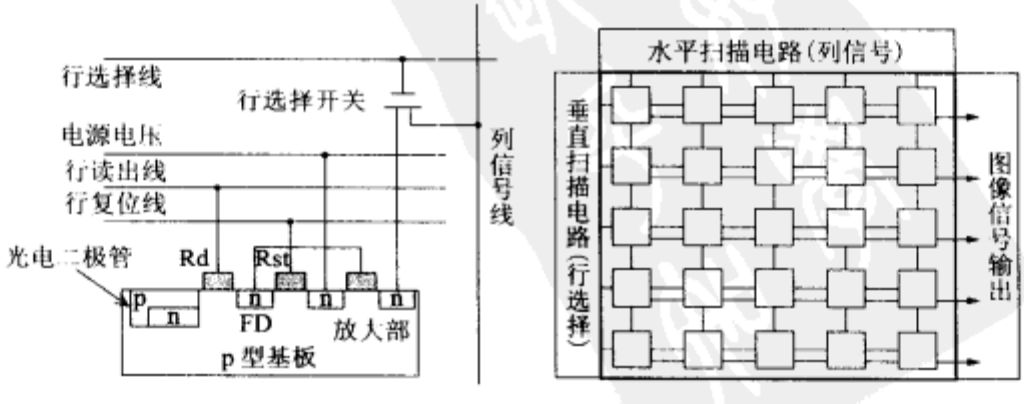
(a) CCD的原理构造



(b) CCD摄像器件的构造(隔行扫描式)

图 9.6 CCD 型固体摄像器件

图像传感器中并不是采用像素电荷转移的办法，而是直接对像素电荷进行电压放大后，通过地址指定的办法顺次将其读出。画面的扫描过程如图 9.7(b)所示，首先在水平方向上按指定的地址读出寄存器中的数据，读完一行数据之后，地址便在纵向上前进一位，接着继续按行读取，直到一帧画面



(a) 图像传感器的原理构造　　(b) 图像传感器信号的输出

图 9.7 CMOS 图像传感器

读完为止，然后再开始进行下一帧画面的读出。由于读出电路里有一个CDS(相关二重采样)电路，因而读出的信号是复位时的基准电平与新输入的信号电平的差分。

摄像管

摄像管是利用光电效应或光电导效应把成像在光电面上的景物图像变换成电信号的器件。利用光电导效应制成的摄像管称为**光电导型摄像管**，根据其光电导材料的不同，它可分为很多种类，如硫化锑管、硒砷锑管等。利用光电效应制成的摄像管称为**移像型摄像管**，超正析像管等就属于这一类。此外还有用于夜视的摄像管，管子上带有像增强器，因而灵敏度很高。

光电导型摄像管

移像型摄像管

4 显像器件

要 点

显像器件能够把图像信号等包含着图像信息的电信号变换成图像、文字等光信号。显像器件的种类很多，有显像管、FED、等离子体显示器、液晶显示器等。人们所期待的壁挂式电视机已经得以实现，它画面大、机身薄、省电，是近年来发展非常迅速的一个新领域。

解 释

显像管的构造和工作原理

电子枪

显像管是一个真空器件，它大致由**电子枪**、荧光屏和偏转线圈三大部分构成。电子枪发射电子束，电子束在偏转线圈磁通量的作用下做自上而下、自左而右的扫描运动，同时又受到阳极上的高电压吸引而向着荧光屏做加速运动，当电子束撞击到荧光屏上时，荧光屏就会发亮。另一方面，图像信号加在电子枪的栅极上，因而电子束的强弱随着图像信号的大小变化，于是荧光屏的亮度也就随着图像信号的大小发生变化，使图像得以重现。

磁偏转与静电偏转

偏转

磁偏转

静电偏转

电子束在显像管内的上下左右摆动称之为**偏转**。如果这种偏转作用是利用安装在显像管外面的偏转线圈的磁通量变化来实现的，就称其为**磁偏转**；如果偏转作用是利用安装在显像管内部的偏转电极板之间的电场变化来实现的，就称其为**静电偏转**。

彩色显像管

彩色显像管的荧光屏是由规则排列着的红、绿、蓝三种荧光粉的点阵构成的，相应地，电子枪也由三根构成。另外，在荧光屏的前面还有一个遍布网孔的金属板，网孔与红、绿、蓝点阵相对应，称之为阴罩，它能使红、绿、蓝电子枪所发射的三束电子束分别只撞击荧光屏上的红、绿、蓝荧光粉。也就是说，荧光屏上所显示的图像颜色是由相加混色法来实现的。彩色显像管的三根电子枪的配置方式有两种，一种是等

边三角形排列，另一种是“--”字形排列。与之相对应，荧光粉点阵也有等边三角形结构和“--”字形结构两种（见图 9.8 和图 9.9）。

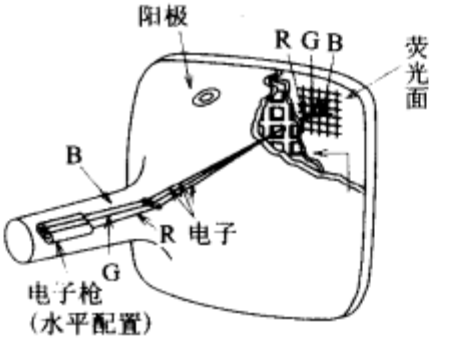
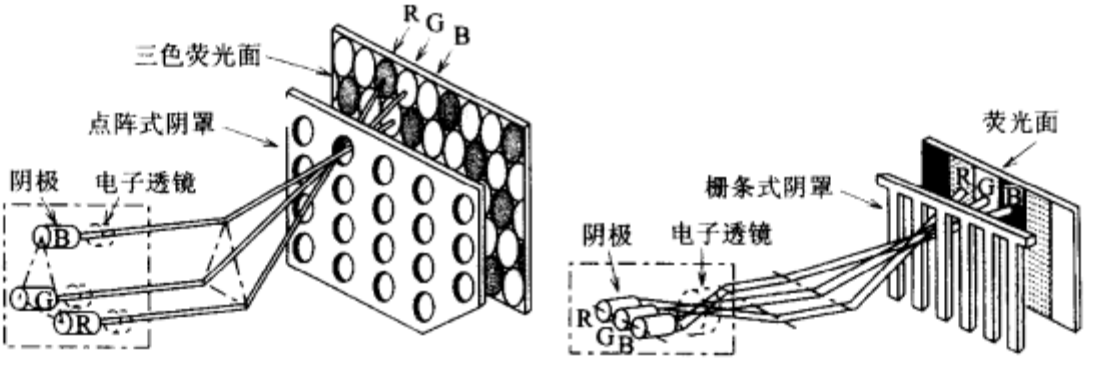


图 9.8　彩色显像管



(a) 三角形配置的电子枪　　(b) “一” 字形配置的电子枪

图 9.9　电子枪和阴罩的结构

场致发射显示器

场致发射显示器（FED：Field Emission Display）没有彩色显像管那样的电子枪和电子束偏转机构，它的电子发射部分是按像素配置的。这种显示器件可以做成宽视野角的薄平板形，且响应速度快，颜色质量好。日本于 1986 年开始研究的 SED（Surface-conduction Electron-emitter Display）方式已于 2005 年制成了大画面薄形显示器。

如图 9.10 所示，SED 方式的三色发光体为并排结构，各发光体的发光原理如图 9.11 所示。真空密封的两个电极之间有一个纳米级的狭缝，当狭缝上加有电压 V_f（十几伏）时，狭缝便因隧道效应而释放出电子，电子在 V_a（10kV 左

右)的作用下被加速,撞击到荧光体上使之发光。这种器件的彩色显示是利用电子撞击红、绿、蓝分别配置的荧光体单元来实现的,并不需要液晶显示器中的那种背景光源,即使尺寸大到超过 40in,厚度也只有几厘米。其特点是发光效率在 5 lm/W 以上,效率高,耗电小,大约只有等离子体显示器耗电量的 1/3。

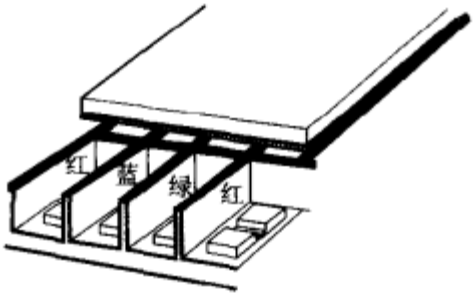


图 9.10 SED 方式的构造

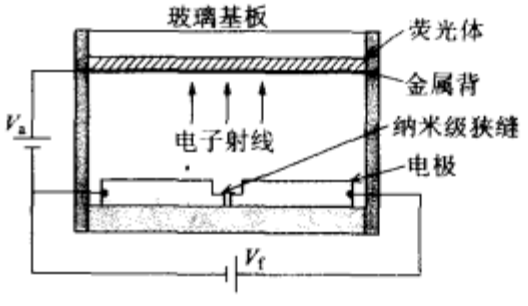


图 9.11 SED 方式的发光原理

液晶显示器

液晶显示器(LCD:Liquid Crystal Display)是一种非辐射光型显示器件,它是利用称为液晶的液体所具有的流动性和晶体所具有的多折射性(折射率随着光通过时的方向的不同而不同)这两种性质来实现图像显示的。

液晶的材料是一种长度约 0.01μm、粗细约 0.001μm 的细长棒状有机化合物,这种棒状物质的配置能够在外部电场的作用下发生变化。现在用得较多的是 TN(Twist Nematic)型液晶元件,它的结构是内表面上设有透明电极的两块玻璃板之间(数 μm)密封着 TN 液晶,棒状液晶是按照朝着玻璃板平行地扭转 90°那样配置的。通过将配向膜扭转 90°,可对液晶分子配向。图 9.12 示出了它的工作原理。在透明电极间未加电压的状态下,进入液晶内的入射光的偏振面沿着扭转方向转过 90°,通过液晶内部之后,便从只让水平偏振光通过的偏振片 B 穿出。当透明电极间加有电压时,90°扭转消失,入射光的偏振面不发生扭转,因而不能穿过偏振片 B。液晶显示器就是利用这种透光量随着电极上所加电压的变化而变化的原理来实现图像显示的。

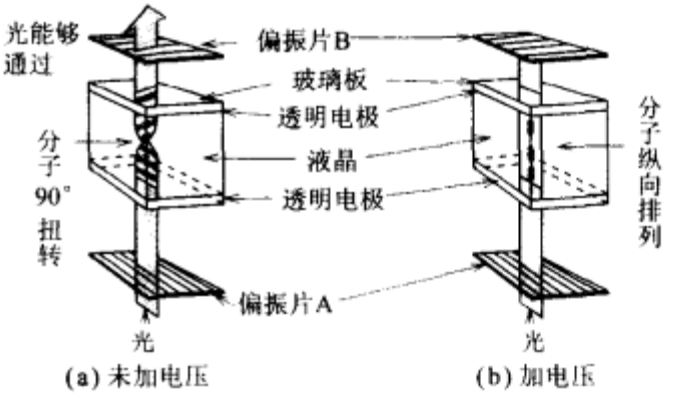


图 9.12　液晶显示的原理

彩色液晶显示器采用的是动态矩阵(AM)方式，如图9.13所示，每个像素上都带有用于产生三基色的红、绿、蓝滤色片，透明基板上还有用于控制各像素透光量的晶体管。这种晶体管是薄膜晶体管(TFT：Thin Film Transistor)，它与液晶板是一体化的。除了TN方式外，液晶显示器还有IPS(In-Plane Switching)方式、VA(Vertical Alignment)方式和OCB(Optically Compensated Bend)方式，这些方式在对比度、视野角特性、响应速度等方面有所改善。IPS方式是让液晶分子在水平面内相对于玻璃板旋转的方式；VA方式是液晶分子垂直于玻璃板配向、加上电压时便倒向水平方向的旋转方式；OCB方式是液晶分子产生弯曲配向的方式，它需要光学补偿滤光片。背景光多采用冷阴极荧光管(CCFL)，它是用逆变电路来驱动的。液晶显示器的寿命取决于背景光的寿命，如果以背景光亮度下降到初始亮度的50%作为寿命的话，现在的液晶显示器寿命可达6万小时，已经与其

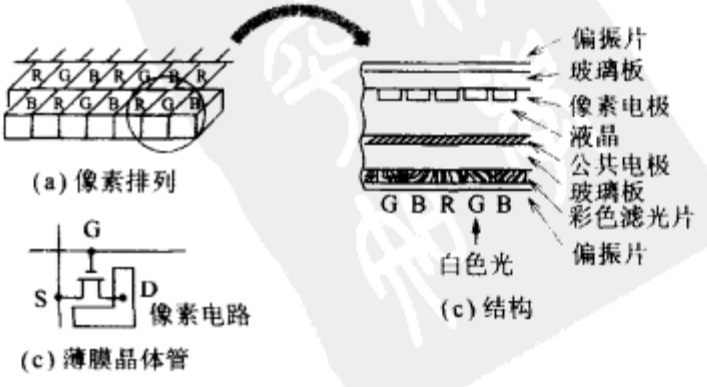


图 9.13　彩色液晶显示器

他显示器的寿命一样长了。

等离子体显示器

等离子体显示器(PDP:Plasma Display Panel)的构造如图 9.14 所示,三色发光体是并排配置的,图 9.15 是各发光体的发光原理示意。

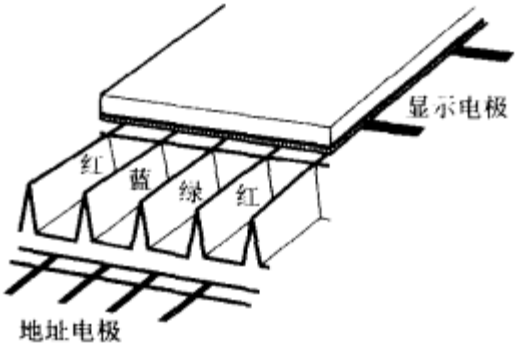


图 9.14 等离子体显示器的构造

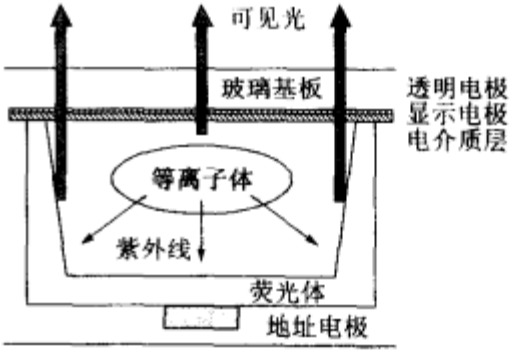


图 9.15 等离子体显示器的发光原理

等离子体显示器的两块玻璃板之间是像素宽度空间(放电单元),里面密封着放电气体。当地址电极与显示电极之间加有电压时,放电单元就会产生等离子体放电而发出紫外线,紫外线照到放电单元内所涂敷的荧光体上,荧光体便发光。

等离子体显示器的荧光体有红、绿、蓝(R、G、B)三种颜色,它能够显示出与彩色显像管一样的颜色。

65～32 型的大画面等离子体显示器已经制成,其厚度在 10cm 以下,薄得与画面大小都显得不成比例,视野角也达到了上下左右均为 176°。有的产品画面质量已与显像管一样好,像素在 1365×768～852×480 之间,可得到高清晰度的图像。扬声器等外部磁通量的影响很小,等离子体显示板的寿命长达 6 万小时以上,65 型机器的耗电量约为 650W,这个值相当于画面的大小乘以 10,通过技术革新,耗电量有望进一步减小。

相关知识

◆ 磁偏转方式与静电偏转方式

磁偏转方式主要用于电视显像管,静电偏转方式主要用于示波器。示波器常常用于测量很高的频率,这时扫描时间是非常短的。

闲外话

为什么把12月6日定为“声音日”？

1877年，也就是日本的明治10年，12月6日这一天，美国大发明家爱迪生正在做一个实验。他一边用手柄转动着一个上面贴着锡纸的圆筒，一边大声地唱着童谣：“玛丽娅的羊，羊羊羊……”。唱完之后，他把圆筒倒转回开头的位置，再一次转动手柄，这时候，他听到了自己的声音，“玛丽娅的羊，羊羊羊……”。

这个圆筒就是最早的录音机，它是爱迪生的一大发明，1877年12月6日是录音机诞生之日。

这是一项了不起的发明，消息一经传出，人们都想亲眼看一看录音机是怎么一回事，许多人便纷纷到位于门罗公园地区的爱迪生研究所去观看。由于要去的人数太多，以至于还专门为此开了一列特别列车，真是热闹极了。那一年，爱迪生刚好30岁。

在谈到这项发明成功的原因时，爱迪生说是“因为耳聋才发明出了录音机”。关于爱迪生耳聋的事还有一个传说。小时候，爱迪生曾在火车上打过工，有一次他差一点误了车，而就在他急着要上车的时候，一个乘客打了他一耳光，从此他的耳朵就聋了。

爱迪生喜爱音乐，他在一次弹着钢琴欣赏的时候，忽然注意到了声音是空气振动引起的，于是他就想，如果能像地震仪那样把声音的振动记录下来，声音不就能重放出来了吗？他牢牢地抓住了这个灵感，录音机也终于发明成功了。

日本的“声音日”便是日本听觉协会根据这一历史故事选定的。

5　无线电广播

要　点

以公众直接接收为目的而利用电波发送节目，称为无线电广播。从发射频率来说，无线电广播有标准无线电广播（中波广播）、短波广播、超短波（FM）广播。从节目来说，有新闻报道、音乐及艺术等。

解　释

无线电广播电台系统

图 9.16 示出无线电广播电台的构成。播音员的声音在播音室里由拾音器变换成电信号后传送给副控室，此外，也有根据需要用录音带和 CD 唱盘等作为节目源制作的节目，这些节目都经副控室传送给主控室。**主控室**将来自各副控室、台外中继及其他广播电台的语音节目按节目单加以选取，通过有线线路或无线线路（STL）送给发射台。发射台将送来的语音信号经发射机进行调制后，以必要的功率从天线发射出去。发射台几乎都是无人值守的，为了减少因故障而停播的现象发生，所有发射台都备有热备份发射机。

主控室

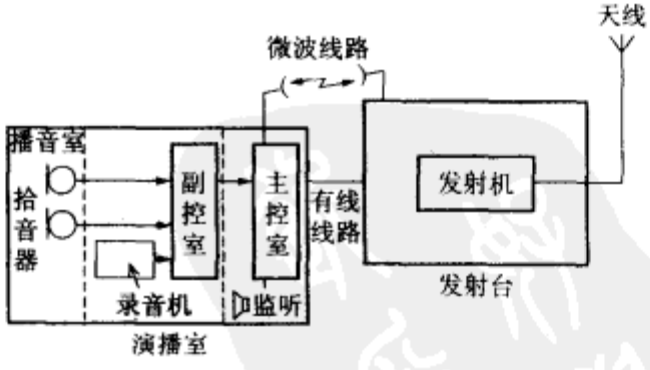


图 9.16　无线电广播电台的系统

中波广播和短波广播

中波广播的频率范围为 526.5～1606.5kHz。1080kHz 的总频段，按 9kHz 的间隔共分为 120 个频道。短波广播的频率为 3.9～26.1MHz。中、短波广播的发送方式都采用双边带调幅方式（DSB-AM）。发射功率从 100～500kW 的大功

率到100kW以下的小功率都有所应用，是根据收听地区范围及与相邻国家电台间的干扰等因素决定的。AM立体声广播有摩托罗拉方式、哈里斯方式、卡昂方式等，日本采用的是兼容性正交振幅调制方式（摩托罗拉方式），能够兼容非立体声的单声道接收机。

超短波广播

超短波广播的频段是76～90MHz中的76.1～89.9MHz，按100kHz一个间隔分为139个频道。广播方式采用频率调制（FM方式）和单声道播放或双声道立体声播放的方式。

超短波电波的传播没有电离层反射，只有视距范围内的直接波，因而干扰较少。调频方式需要的频带虽然宽，但噪声小、音质好，适合于播放音乐节目。

FM立体声广播

单声道广播
立体声广播

单声道广播是用一个语音信号去调制一个载波的调频广播方式；**立体声广播**是用左、右两个语音信号以复用方式去调制一个载波来进行发射，到了接收端再把原来的两个语音信号分离开来。这是一种能使音乐产生立体感的调制方式。

为了与单声道广播兼容，常采用加入导频信号的载波抑制AM-FM方式。图9.17所示为调制信号的频谱分布。立体声信号的L信号（左声道信号）和R信号（右声道信号）通过矩阵电路后，得到的和信号（L+R）作为主信号，差信号（L−R）对38kHz副载波进行平衡调制后作为副信号；由于副信号中不含副载频，所以要加一个19kHz导频信号。这三个信号所合成的复合信号在发射机中进行调频后发射出去。

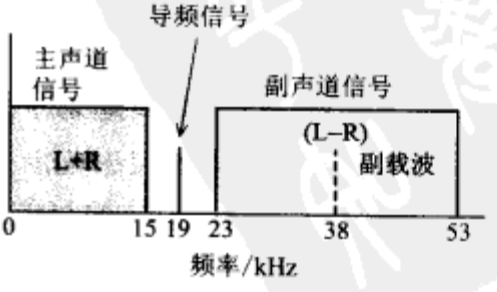


图9.17　FM立体声信号

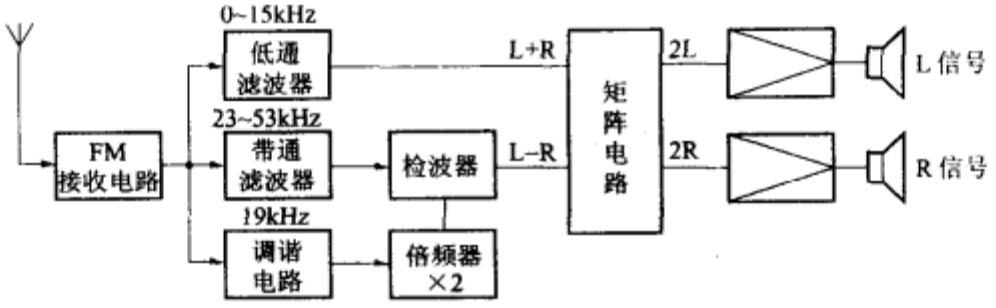


图 9.18 FM 立体声接收机的系统

图 9.18 是立体声接收机的系统。(L+R)信号直接从低通滤波器得到,(L-R)信号则是通过给带通滤波器输出的平衡调制信号加上 38kHz 副载波后从检波器输出得到,这两个信号在矩阵电路中相加、减后得到立体声双声道信号的 L 信号和 R 信号。

兼容性正交振幅调制方式

兼容性正交调幅方式是用和信号和差信号进行正交调制,去掉了其合成信号的振幅变化部分,而其载波采用和信号进行振幅调制的方式,它对包络检波式单声道接收机具有兼容性。

题外话

3月22日——广播纪念日

1925 年(日本的大正 14 年)3 月 22 日,NHK 东京广播中心的前身——东京中央广播电台(JOAK),从设立在港区芝浦东京高等工艺学校图书馆的试播台发出了正式试播的第一个声音:"JOAK,这里是东京广播电台。从今天这个时候起,我们开始广播……"。当时的广播频率是 800kHz,发射功率为 500W。为了纪念这个日本广播首播日,日本于 1943 年(昭和 18 年)决定把 3 月 22 日作为"广播纪念日"。

同年 5 月,日本在现在的爱岩山广播博物馆这个地方设立了正式广播电台,7 月 12 日开始正式广播。在此前后,大阪广播电台、名古屋广播电台也开始广播。那个时候,民间广泛流行的接收机是极其简单的矿石收音机。

题外话

频率的单位是用德国科学家赫兹的名字命名的

赫兹(Heinrich Rudolf Hertz,1857～1894)从柏林大学毕业之后,曾经在亥姆霍兹教授的研究室当助教。当时,亥姆霍兹教授正在考虑用实验方法来证明麦克斯威尔所预言的电磁波的存在性,他看到赫兹思维敏捷,又善于做实验,就把这件事交给了赫兹。

然而,赫兹对电波的正式研究还是在他28岁当了卡尔斯路埃工业大学实验物理学教授之后的事。赫兹认为,如果能够产生一个快速的电振荡,就会有电磁波向周围空间中传去。于是,他制作了一套电振荡发生装置和检波器,在实际产生出电波的同时,成功地检测到了电磁波的存在。

赫兹用实验的方法实际证明了20年前麦克斯韦用数学方法所预言的电波的存在,也把他的名字留在了频率的单位上。今天,人们日常生活中所使用着的电视机、便携式电话机等许多的电器,都无不受惠于赫兹当年的贡献。

6　电视原理

要　点

电视是专门传送图像信息的系统。发送端把投射到摄像机上的图像亮度和颜色变换成电信号传送出去，接收端再把这种电信号用显像管变换成光的亮度和颜色，从而重现原图像。

电视有黑白电视和彩色电视之分，日本采用的是NTSC制式，现在，已经有了高清晰的HDTV和数字广播，画面质量大为提高。

解　释

图像的传送

像素

电视的原理是先用电视摄像机把图像分解为称为**像素**的小面积，得到称为图像信号（视频信号）的电信号，并将这种电信号用有线或无线方式传送出去。到了接收端再重新由电信号组装成图像。图像分解或组装的过程称为**扫描**。为了使接收端得到正确的再现图像而采用了一种特殊信号，该信号称为**同步信号**。

扫描

同步信号

扫描与隔行扫描

水平扫描

垂直扫描

扫描线

图像的分解和组装是由电子束按图9.19所示的方向从左到右、从上到下高速扫描画面来实现的。横向扫描称为**水平扫描**，纵向扫描称为**垂直扫描**，扫描所走过的直线称为**扫描线**。扫描线越多、扫描速度越高，传送的图像就越逼真，闪烁感也越小。NTSC制式电视中，水平扫描的重复频率为

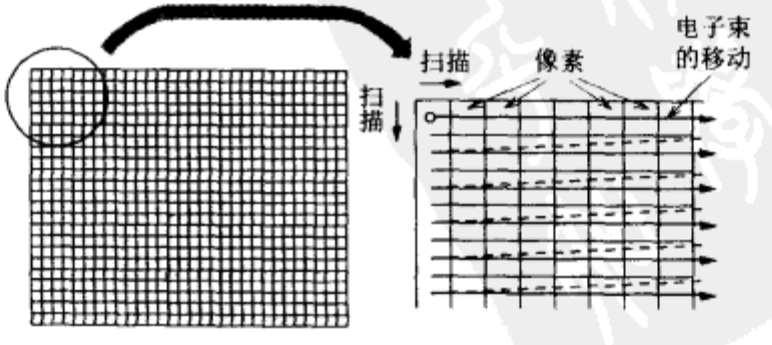


图9.19　像素和扫描

15 750Hz，垂直扫描的重复频率为60Hz，扫描线总数为525条。

NTSC制式每秒钟传送的图像是30幅。为了减轻画面的闪烁感，实际的扫描方法采用了如图9.20所示的跳过一行的办法。首先在1/60s时间里用262.5行扫描完一幅画面，这次扫描称为**奇数场**扫描。然后，再用1/60s的时间扫完奇数场剩下的262.5行，这次扫描称为**偶数场**扫描。两场扫描在人眼视网膜上的效果是一幅线数为525线的合成图像。这种扫描方式称为**隔行扫描**。这样，虽然接收到的图像是每秒30幅，但实际上是按每秒60幅投射到人眼上的，因而看到的图像闪烁感大为降低。此外，也有不隔行而把一幅画面从头到属按顺序一次扫描完的，这种扫描方式称为逐行扫描。

奇数场

偶数场

隔行扫描

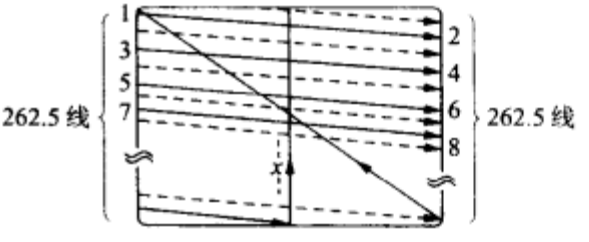


图9.20　隔行扫描

水平偏转和垂直偏转

在显像管等采用电子束扫描的器件中，电子束的上下左右偏转是通过磁通量变化来实现的，为了产生偏转磁通量，需要有如图9.21所示的锯齿形电流。

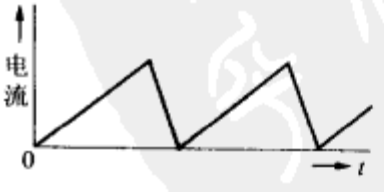


图9.21　锯齿形电流

当电子束撞击到显像管的荧光屏上时，荧光屏上便会形成光点。能使光点沿着水平方向移动的电流称为**水平偏转电流**，如图9.22(a)所示；能使光点沿着垂直方向移动的电

水平偏转电流

垂直偏转电流

流称为**垂直偏转电流**，如图 9.22(b)所示。这两种电流分别加在用来产生偏转磁通量的水平偏转线圈和垂直偏转线圈上。水平偏转电流的重复频率为 15 750Hz(扫描线数 525×帧数 30)；垂直偏转电流的重复频率为 60Hz(帧数 30×隔行比 2)。

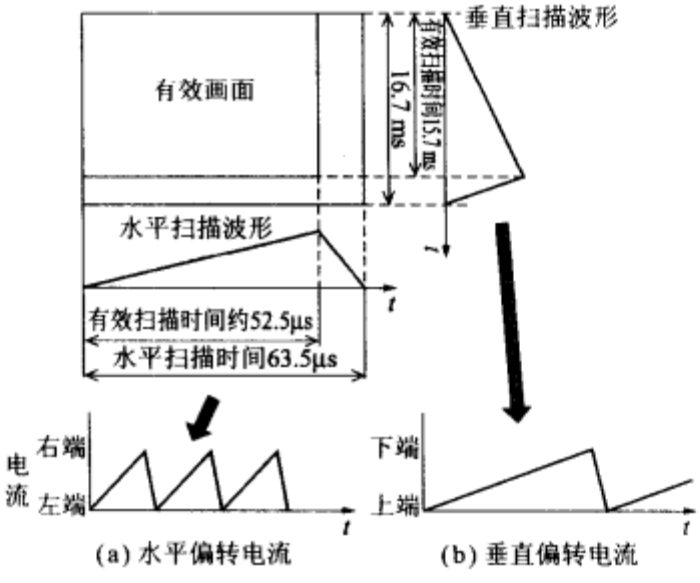


图 9.22 偏转电流的波形

液晶显示器和等离子体显示器采用的不是电子束扫描方式，而是地址指定方式，也就是说，当所指定的像素地址像水平扫描和垂直扫描那样变化时，每个像素便依次按照图像信号的强度发光，从而显示出所要显示的图像。

有效扫描线数

有效扫描线长度
有效扫描线数
回扫时间

接收端的重现图像是由横向扫描线的光栅构成的。构成一幅画面光栅的扫描线的长度称为**有效扫描线长度**，构成一幅画面的扫描线总数称为**有效扫描线数**。从一次扫描结束到下一次扫描开始的时间称为**回扫时间**，为了不让回扫光栅出现在画面中，需要用回扫消隐信号。按规定标准，水平回扫消隐时间不能超过水平扫描时间的 18%，垂直回扫消隐时间不能超过垂直扫描时间的 8%。图9.23所示是有效扫描线数和回扫消隐时间的示意。

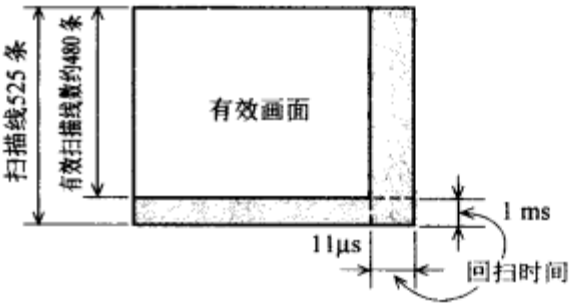
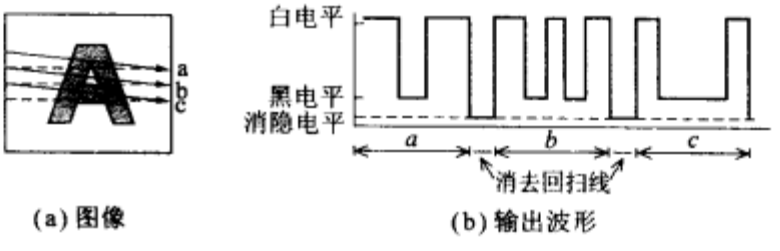


图 9.23　有效扫描线数和回扫消隐时间

图像信号和同步信号

当用摄像机摄取图 9.24(a)所示的图像时，其输出为如图 9.24(b)所示的电压信号。这就是图像信号，图像亮的地方对应于信号的白电平，暗的地方对应于黑电平。回扫期间的信号比黑电平还低，是因为回扫线被消隐信号彻底消去的缘故。迫使显像端的扫描时间与摄像端相一致的措施称为**同步**，如果同步定时不准，就难以重现原图像。

同步



(a) 图像　　(b) 输出波形

图 9.24　图像信号

因此，要正确重现原图像，发送端就要在传送图像信号的同时再传送一个同步信号。同步信号分为**水平同步**和**垂直同步**两部分，水平同步信号位于水平消隐期间，它规定了每一行水平扫描线的开始时间；垂直同步信号位于垂直消隐期间，它规定了每一场的开始时间。电视信号是由图像信号、同步信号和消隐信号复合而成的，称为复合图像信号，也简称为**图像信号**。

水平同步

垂直同步

图像信号

彩色电视的原理

红(R)、绿(G)、蓝(B)三基色相搭配可以得到各种颜色。彩色电视就是应用光的这种三基色原理来形成彩色图像的。用图 9.25 所示的彩色电视摄像机把所能得到的所有颜色都

分解成红、绿、蓝三基色，然后以与黑白电视相同的方式传送出去，接收端再采用三基色合成的办法，就可以得到彩色图像。不过，这种方式需要的频带相当于黑白电视频带的3倍，因此，NTSC制式彩色电视中采用了如下的办法来节省带宽，即将三基色信号变换成一个亮度信号 Y 和两个色度信号 I 和 Q，通过亮度信号和色度信号的配合来达到能用与黑白电视相同的带宽来传送彩色电视信号的目的。

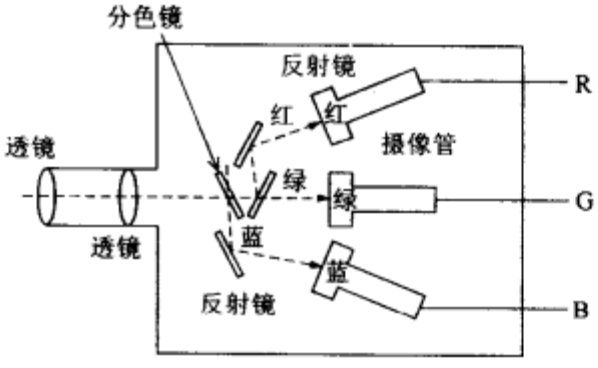


图 9.25 彩色电视摄像原理

NTSC 制式

NTSC制式是美国电视委员会(NTSC: National Television System Committee)于1953年提出的美国电视标准制式，它是美国的RCA公司开发出来的，日本采用的就是这种制式。该制式规定，将 R、G、B 三基色信号按式(9.4)至(9.6)变换为 Y、I、Q 信号：

$$Y=0.30R+0.59G+0.11B \tag{9.4}$$

$$I=0.60R-0.28G-0.32B \tag{9.5}$$

$$Q=0.21R-0.52G+0.31B \tag{9.6}$$

这3个信号的带宽分别为4.0MHz、1.5MHz、0.5MHz。Y 信号采用与黑白电视相同的方式传送。两个色度信号以正交平衡调制方式调制在大约为3.58MHz的彩色副载波上，并以图9.26所示的频谱与亮度信号一起传送。NTSC制式具有彩色电视与黑白电视兼容的特性。

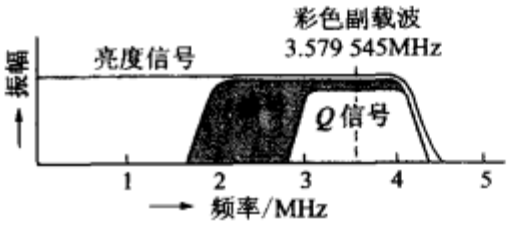


图 9.26　NTSC 制式彩色电视信号的频谱

相关知识

◆ 世界各国的电视制式

除了 NTSC 制式外，电视制式还有 PAL 制式、SECAM 制式等。各个国家所采用的图像带宽和调制方式有所不同，中国、英国、意大利、德国等国采用的是 PAL 制式，扫描线数为 625 线，法国、俄罗斯、匈牙利等国采用的是 SECAM 制式，扫描线数为 625 线。表 9.1 中给出了各种彩色电视制式的基本规格参数。

表 9.1　各种彩色电视制式

	NTSC	PAL	SECAM
扫描线数	525 线	625 线	625 线
帧数/s	29.97	25	25
垂直同步频率(场数/s)	59.94Hz	50Hz	50Hz
水平同步频率	15.734kHz	15.625kHz	15.625kHz
色副载波频率	3.579545MHz	4.433619MHz	4.40625HMz(R-Y) 4.25000MHz(B-Y)
色度信号调制方式	正交平衡振幅调制	正交平衡振幅调制 逐行倒相	线顺序频率调制
占有带宽	6.0MHz	7/8.0MHz	8.0MHz
图像及声音载波	4.5MHz	5.5/6.0MHz	6.0/6.5MHz

◆ 地面波数字广播方式

地面波数字广播的主要规格参数如表 9.2 和表 9.3 所示。

表 9.2 地面波数字广播方式的主要规格

项 目	规 格
传输带宽	约 5.57MHz(13 个频段)
调制方式	分层采用 DQSK,QPSK,16QAM,64QAM(TMCC 信号为 DBPSK)
误码校正方式	内码:卷积码(编码率 1/2,2/3,3/4,5/6,7/8)外码:里德-所罗门压缩码(204,188)
传输容量	最大 23.234Mbit/s

表 9.3 地面波数字广播的主要参数

项 目	参 数		
传输模型	模型 1	模型 2	模型 3
载波间隔	约 4kHz	约 2kHz	约 1kHz
载波总数	1 405 个	2 809 个	5 617 个
符号/帧	204 符号		
有效符号长度 TW	252μs	504μs	1 008μs
隔离间隔长度	有效符号长度的 1/4,1/8,1/16,1/32		
帧长	54.014 5~64.26ms	106.029~128.52ms	212.058~257.04ms
交错	频率交错,时间交错		

闲 外 话

硅与碳的亲密关系

碳元素的“碳”与煤炭的“炭”,在汉字读音上是一样的,它们之间的确有一些关系。作为半导体主要材料的硅,它与碳在元素周期表中同处一族,有着极为相似的化学性质,然而,平时人们并未把碳和硅的形象联系在一起。不过,在无线电广播的历史上,它们倒是结下了亲密的关系。

要收听无线电广播,得有把声音频率从载波中分离出来的检波器。在无线电广播普及之初,这种检波器就曾与碳有关。1906 年,美国人旦乌丁发明了用金刚砂所制成的矿石检波器。金刚砂也称为碳化硅,它是加热焦炭和黏土的混合物时所得到的结晶,而焦炭就是碳质燃料。后来,美国的一位无线电工程师皮卡尔发现了硅结晶能用作无线电检波器。碳和硅都为无线电广播的普及作出了贡献。

7　电视广播系统的组成

要　点

日本的地面波广播已于2004年12月起从模拟广播向数字广播过渡，各地区的数字广播也已经开始了。现行的模拟广播预定于2011年全部停播。

解　释

电视广播系统的组成

日本电波法第2条对“电视广播”是这样规定的：“应能播放静止和移动事物的实时图像、语言伴音及其他音响效果（包括由文字、图形、图像及其他信号合成的信号）”。电视广播系统的组成如图9.27所示，无论是模拟广播还是数字广播，除了传输线路上所传输的信号分别为模拟信号和数字信号这一点以外，其他方面基本上是一样的。

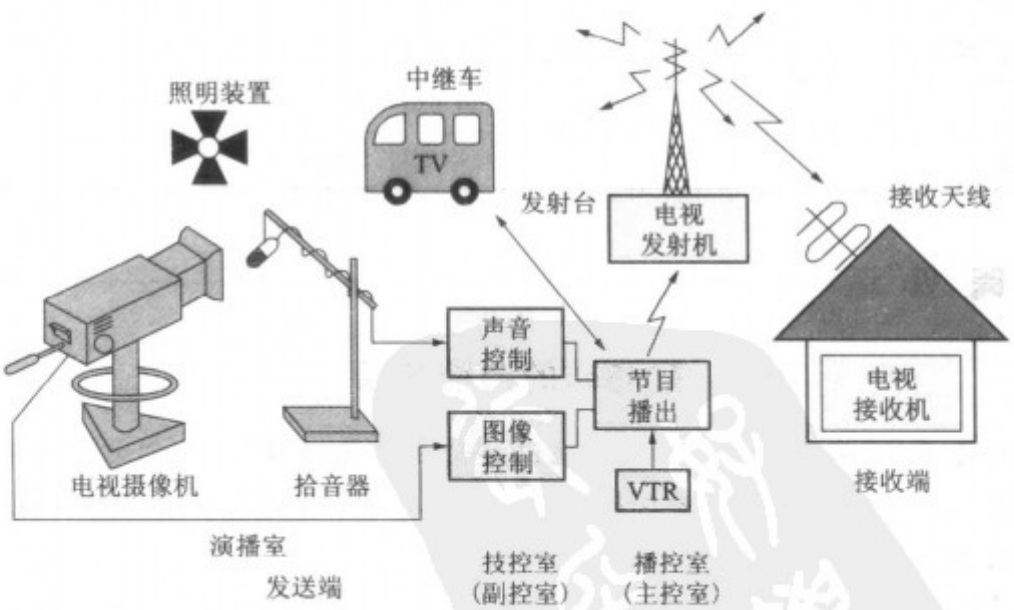


图9.27　电视广播系统

电视信号的播放

地面波模拟电视广播可在VHF波段和UHF波段中播放，其图像采用VSB调制方式（残留边带方式，它是AM方式的一种），声音采用FM调制方式，占有频带宽度为

6MHz，其频带结构如图 9.28 所示。地面波数字电视广播只在 UHF 波段中播放，其图像和声音都采用如图 9.29 所示的数字调制方式（DQPSK，QPSK，16QPSK，64QAM，DBPSK），占有频带宽度为 5.57MHz，共分为 13 个频段和 3 个频道。

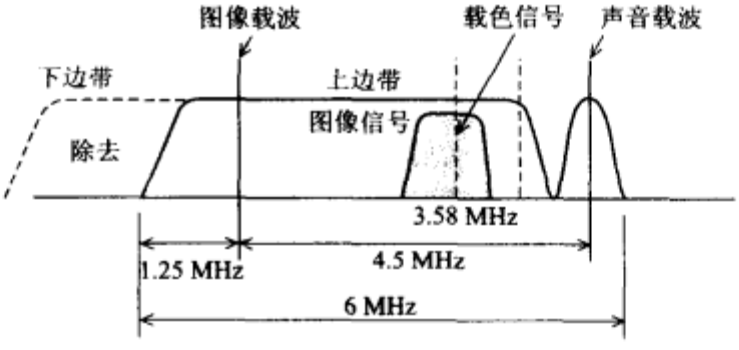


图 9.28 残留边带特性

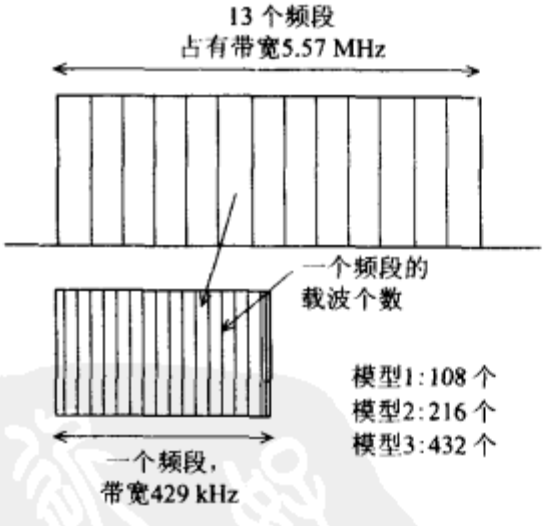


图 9.29 地面波数字广播的频带

电视信号的接收

地面波电视广播正在从模拟方式转变为数字方式，那么，电视接收机是不是一定得换成新式的呢？其实，只要买一个新式的高频头就行了。电视广播从模拟方式变为数字方式后，具有以下的优点：

① 不受多径效应的影响（没有重影）。

② 移动接收效果好（在汽车内接收画面也不会紊乱）。

③ 能用单一频率转播，有利于频率的有效利用。

④ 能进行 HDTV 广播和双向广播。

⑤ 能共享 BS 和 CS 数字广播等媒体的信息。

多径效应是由于发射台所发出的电波经过多条不同路径到达接收机时引起画面出现重影的现象。从发射台直接到达接收机的电波，其传播路径短，花费的时间也短；经过高楼、大山等障碍物的反射后到达接收机的电波，其路径长，花费时间也长，多次反射所花的时间就更长。这样，直射波和由于反射而迟到了的电波所共同构成的显示画面上就会出现重影。数字广播方式的信号里面设置了隔离间隔，它能够排除迟到的电波，因而显示画面上不会出现重影。

DQPSK

移动接收效果好是由于采用了 **DQPSK**（Differential Quadrature Phase Shift Keying）调制和时间交错方式的缘故。

单一频率转播方式可采用图 9.30 进行说明。对于模拟广播方式来说，相邻发射台的频率必须各不相同，而对于数字广播方式来说，所有的发射台可以采用同一个频率。

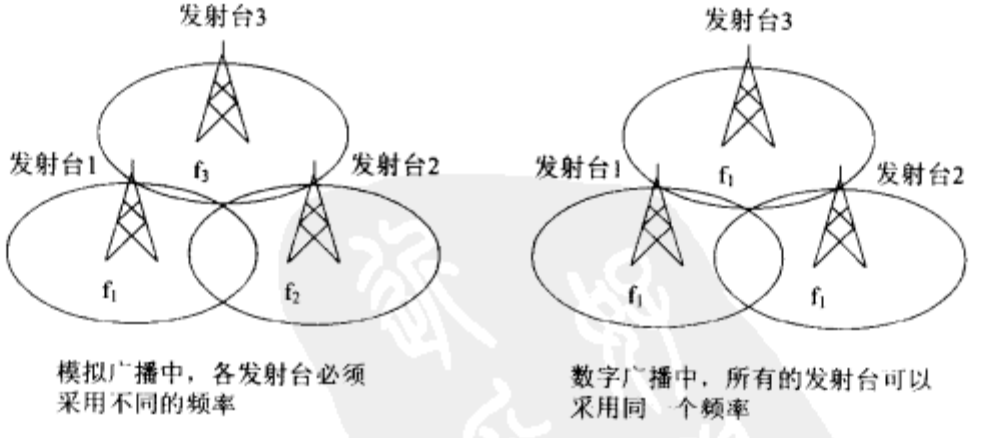


图 9.30　电视发射台频率的关系

相关知识

◆ 电视的历史

电视研究是 1920 年前后以欧美为中心发展起来的，世界上最早的电视广播于 1935 年始于德国。此后，英国和美国也开始进行广播，但由于第二次世界

大战爆发，除了美国的一部分电视台之外，其他的都停播了。在日本，浜松高等工业学校的高柳健次郎先生曾在1927年成功地进行了30线扫描的图像发送、接收实验，而正式的电视广播是1953年2月开始的。

闲 外 话

2月1日——电视广播纪念日

1953年（日本的昭和28年），日本最早的电视广播开始在NHK东京广播电台正式播放，这一年的2月1日下午2点钟，第一句电视广播词从位于东京内幸町的东京广播会馆发出："JOAK-TV，这里是东京电视台"。

当时，签订接收合同的接收机台数为866台，收视费为每月200日元（相比之下，那时候国立大学的听课费为每月500日元）。这一年的8月，日本电视台也开始广播。

8 高清晰度电视和高画质电视

要 点

电视广播开始以来已经走过了50年，大画面电视节目的购买率不断增加，人们对画面质量的要求也越来越高。高清晰度电视和高画质电视就是在这种形势下开始开发的。

解 释

提高电视图像质量的方法

HDTV
EDTV

高清晰度电视(**HDTV**：Hight Definition Television)方式和高画质电视(**EDTV**：Extented Definition Television)方式是提高电视图像质量的两种重要方式。

HDTV

HDTV是一种高清晰度电视方式，与以往的电视方式相比，HDTV的画面宽高比为16∶9，呈横长形；扫描线数为1125线，约增加了一倍。因而，它的画面更大、光栅更细腻、色彩更鲜明。另外，它的声音能成为环场声，音质更好。在模拟式高清晰度电视中，由于传输带宽较窄，所以采用

MUSE

MUSE(Multiple sub-Nyquist Sampling Encoding)方式进行了数据压缩。按照MUSE方式，当采用通常的FM调制方式对HDTV信号进行调制时，带宽约为60MHz。为了将其压缩到卫星广播的一个频道带宽值27MHz，首先将图像进行了数字化，在此基础上再通过将当前帧画面与前一帧画面进行比较而得到差分信号，然后利用数字信号处理的办法，将带宽压缩到约1/4的程度。

EDTV

EDTV是一种高画质电视方式。1989年提出时，主要是希望利用它来实现与NTSC方式有上位互换性的高画质电视。到了1995年，又追加了画面宽高比为16∶9的EDTV-Ⅱ方式，即宽幅高画质电视。EDTV本来是旨在用数字技术来消除图像重影，提高图像亮度和彩色分辨率，以及把逐行扫描广播方式作为目标而开发的，随着数字广播的开播，它已经被淘汰。

9　卫星广播和 CATV

要　点

1957 年，前苏联首次发射了人造卫星。此后，美国于 1962 年发射了以通信为目的的人造卫星，实现了电视卫星中继。把人造卫星发射到赤道上空约 36 000km 的静止轨道上，并从卫星上进行广播业务，这就是卫星广播。

CATV 包括以解决山区或高楼区收视困难问题为目的而采用同轴电缆把电视节目送到各个家庭的电视，和以自办广播或收费电视为目的的电缆电视。

解　释

□ 卫星广播

如图 9.31 所示，卫星广播是这样一种广播系统：它由位于赤道上空的广播卫星把所接收到来自广播中心等地面节目发射台的电波变换成 12GHz 波段的 SHF 电波重新发回地面，从而使各个家庭或公用接收设备能够直接接收电视节目。地面节目发射台采用大口径**抛物面天线**向卫星发送节目和指令，以及接收卫星发回的遥测信号。家用接收天线可采用小型抛物面天线或**平面天线**。

抛物面天线

平面天线

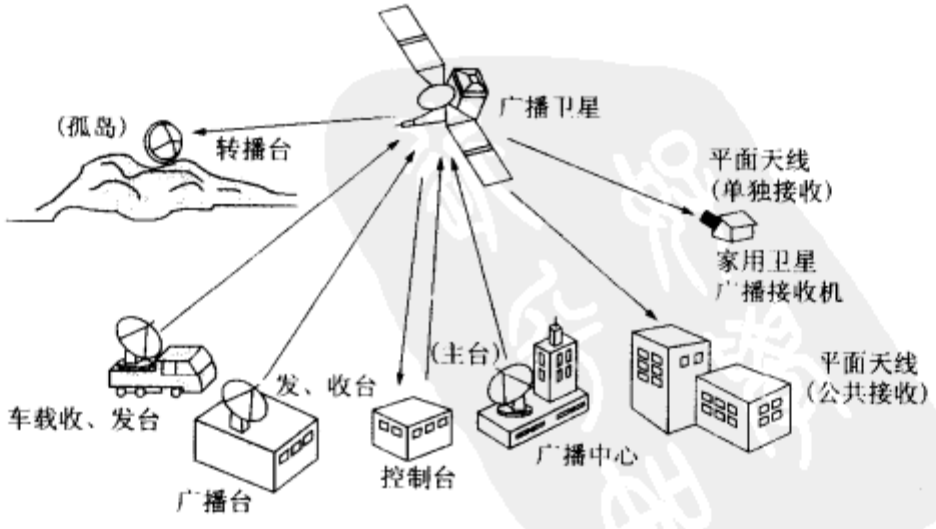


图 9.31　卫星广播的组成

BS

卫星广播可分为两类，一类是 **BS**(Broadcasting Satellite)，

CS

接收频率为11.7～12.2GHz；另一类是**CS**(Communications Satellite)，是播放新闻、电影、体育等特定节目的，接收频率为12.5～12.7MHz。

为了让一个天线能同时接收到BS和CS的电波，BS卫星和CS卫星都布置在东经110°上空36 000km的地方，大致位于越南以南的印度尼西亚群岛加里曼丹岛的上空。卫星上安装了镜面修整型波束天线和高效放大器，日本全土都能用直径为45～60cm的抛物面天线接收到它发射回来的电波。图9.32示出了卫星的布局情形，表9.4给出了卫星的轨道位置及主要技术参数。

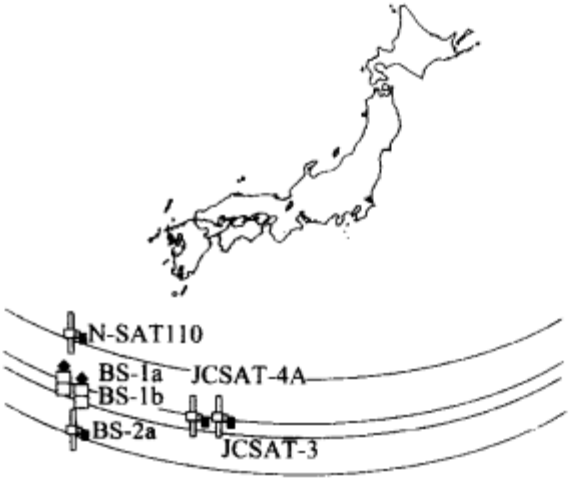


图9.32　卫星布局示意

表9.4　卫星的轨道位置及主要技术参数

卫星名	BSAT-1a	BSAT-1b	BSAT-2a	JCSAT-3	JCSAT-4A	N-SAT-110
轨道位置	东经110°	东经110°	东经110°	东经128°	东经124°	东经110°
发射日期	1997年4月	1998年4月	2001年3月	1995年8月	1999年2月	2000年10月
频带	Ku波段	Ku波段	Ku波段	Ku波段	Ku波段	Ku波段
	11.7～12.2	11.7～12.2	11.7～12.2	12.2～12.75	12.2～12.75	12.2～12.75
偏振方式	圆偏振	圆偏振	圆偏振	垂直偏振	垂直偏振	圆偏振
发射功率	108W	108W	130W	60W	75W	120W
应用台	BS模拟台	BS数字台	BS数字台	BS数字台	BS数字台	BS数字台

* 发射功率为设计功率(稍低于批准功率)。

CATV

CATV(Community Antenna Television 或 Common Antenna Television)最初是为了解决收视困难地区的问题而开发的。在收视困难地区的山顶或高楼顶等电波较强的位置上安装天线,从这里用同轴电缆把广播节目转送给各个家庭。后来所发展起来的向特定地区进行电视转播、自办节目及地方节目的**电缆电视**(cable television)系统,也称为CATV。

电缆电视

电缆电视可以通过电缆与互联网连接以及以双向通信的方式接受互联网服务。

相关知识

◆ 电视图像的格式与D连线插头

BS数字广播和模拟广播的图像信号格式如表9.5所示,图9.33是D连线插头的引脚配置及其所适用的图像信号格式。

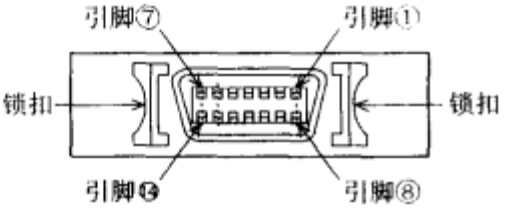
表9.5 BS数字广播和模拟广播的图像信号格式

	BS数字广播					模拟广播	
	1	2	3	4	5		
图像信号格式	525i (480i)	525p (480p)	1125i (1080i)	750p (720p)	1125p (1080p)	标准电视方式	高清晰度电视方式
扫描线总数/根	525	525	1125	750	1125	525	1125
有效扫描线数/根	480	480	1080	720	1080	483	1035
扫描方式	i	p	i	p	p	i	i
画面宽高比	16:9 4:3	16:9	16:9	16:9	16:9	4:3	16:9
帧频/Hz	29.97	59.94	29.97	59.94	59.94	29.97	30.00
场频/Hz	59.94	—	59.94	—	—	59.94	60.00

注:i表示隔行扫描;p表示逐行扫描。()内为有效扫描线数。

◆ 卫星广播的特点

卫星电视是从宇宙空间发射电波,所以能解决岛屿和山区收视困难的问题。卫星电视采用12GHz波段的电波,其方向性强,周围也没有反射,所以接收质量高,并且传送信息也多。数字化的卫星广播信号能在汽车等移动体上接收。卫星广播存在的问题是大雨或降雪会对电波造成衰减,从而使接收效果受到影响。



① Y　　⑧ 引线1GND
② Y-GND　　⑨ 引线2
③ PB　　⑩ 备用线2
④ PB-GND　　⑪ 引线3
⑤ PR　　⑫ 插头连接检测GND
⑥ PR-GND　　⑬ 备用线3
⑦ 备用引线1　　⑭ 插头连接检测

(a) D连线插头的引脚配置

表示	适用的图像信号格式
D1	480i
D2	480.480p
D3	480,480p,1080i
D4	480,480p,1080i,720p
D5	4801,480p,1080i,720p,1080p

i:隔行扫描，p:逐行扫描，
1080p现在尚未广播

(b) D连线插头的图像信号格式

图 9.33　D连线插头

◆ 卫星轨道的种类

通信卫星和广播卫星的轨道可按其高度分为三类。

① 静止轨道(GEO:Geostationary Earth Orbit):高度约为36 000km,为静止卫星所占用。

② 中高度轨道(MEO:Medium Earth Orbit):高度为8000～20 000km,被非同步卫星所占用。

③ 低高度轨道(LEO:Low Earth Orbit):高度约在2000km以下,为非同步卫星所占用。

闲外话

日本最早的天气预报是何时开始的?

现在,由于有了人造卫星气象观测系统,人们随时都能通过收音机或电视机获得准确的天气预报。那么,最早的天气预报是从什么时候开始发布的呢?

1875年,日本在东京的赤坂建立了最初的气象台,1884年6月1日发出了最初的天气预报,当时的报告词是"全国一般风向不定,天气易变化,时而有雨"。

日本气象厅就是根据首次发布天气预报的日子,把6月1日定为气象纪念日的。

10 视频记录

要 点

VTR(Video Tape Recorder)、DVDR(Digital Versatile Disk Recorder)和 HDVR(Hard Disk Video Recorder)是具有代表性的视频记录设备。它们都是用来记录和重放电视的图像信号和伴音信号的设备,根据其记录信号的方式,VTR 是按模拟信号方式记录的,通常称为模拟录像机或简称为录像机;DVDR 和 HDVR 是按数字信号方式记录的,常称为数字录像机。由于数字录像机所记录的图像不会因为反复重放或长期保存而变差,因而录像机已由模拟记录过渡到了数字记录。

解 释

VTR

VTR

VTR 是直接把模拟方式的图像信号记录在磁带上的设备,它的记录原理与盒式录音机基本上是一样的。由于图像信号的频带宽达 4.5MHz,因而记录速度就必须非常快。为了提高记录速度,录像机采取了在走带的同时让磁头做高速旋转运动的走带方式。按这种方式,记录在磁带上的磁迹是一条条斜线。录像机的磁头结构如图 9.34 所示,磁带与磁头间的相对运动情形如图 9.35 所示。

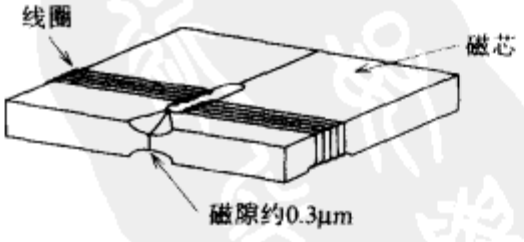


图 9.34 录像磁头

DVDR

DVDR

DVDR 是在 DVD(DVR±R,DVD−RAM,DVD±RW)光盘上记录图像和伴音信号的设备。DVD 光盘上所记录的是数字信号,并且是利用数据压缩技术对图像和伴音的数据进行了大幅度压缩的信号。DVDR 的记录原理与 CD(压缩

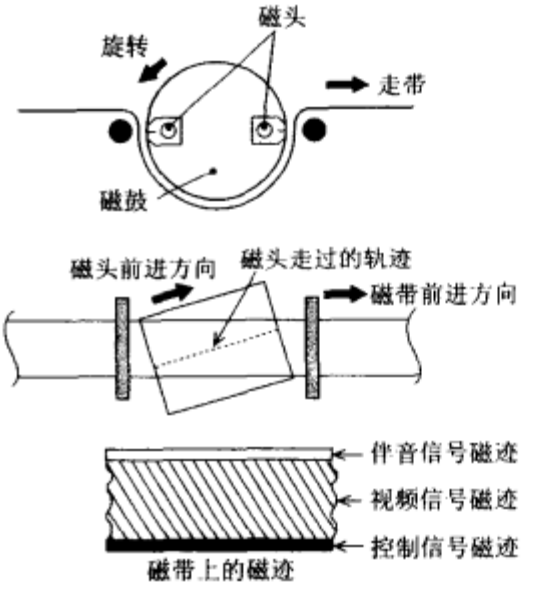


图 9.35　VTR 的走带方式

光盘)一样,就是当激光束照射到光盘上时,光盘的记录膜就会因为温度上升而分解出有机色素,或者因为熔解急冷和徐热徐冷而形成不同的非晶状态,这样,记录膜的反射率就发生变化,从而将信息记录在光盘上。与 CD 相比,DVDR 的记录跟踪方法从三束法(三点法)变成了相位差方式,并且,激光束的直径从 1.42μm 减小到了 0.89μm,光道节距从 1.6μm变为 0.74μm,最小节距尺寸从 0.87μm 变为 0.4μm,减小了记录编码和误码校正等的数据冗余度,使记录容量大为增加。图像压缩方法采用的是 **MPEG**(Moving Picture Experts Group)标准,通过只检测图像运动信息的压缩方法减小了实际记录的数据。

MPEG

按照MPEG-1～MPEG-4的规格标准,DVDR 的 MPEG-1 方式再生声像质量与 VTR 相当,其 MPEG-2 方式再生声像质量与高清晰度电视 HDTV 相当。

图 9.36 所示为 DVDR 的声像再生系统框图。

HDR

HDR 是在硬盘(HD)上记录经过数字技术处理后的图像和伴音信号的设备,其特点是能够一边录像一边重放稍前面的录像。它的记录媒体是硬盘,主要作为短时间保存时的记录之用。当需要长期保存时,可以再将数据记录到 DVD

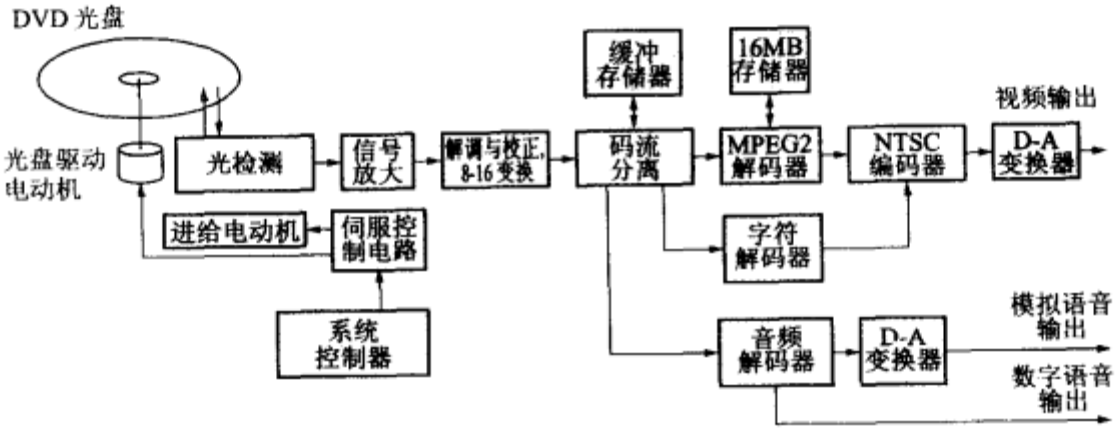


图 9.36 DVDR 声像再生系统框图

或 D-VHS 中去。实际上，HDR 与 DVDR 一体化的录像机已经制造出来了。HDR 的记录时间长短随记录模式而不同，HD 容量为 500GB 的 HDR 型号，其记录时间长短与记录模式的关系如表 9.6 所示。

表 9.6 HDR(500GB 型)的录像时间

记录模式	HQ 模式	SP 模式	EP 模式
记录时间	约 114h	约 171h	约 342h

相关知识

◆ DVD 光盘的规格

表 9.7 中给出了 DVD 光盘的规格，表 9.8 是它的格式，图 9.37 示出了 DVD ±R 与 DVD±RW 的构造差别，图 9.38 示出了 DVD−R 与 DVD+R 的差别。

表 9.7 DVD 光盘的规格名称和记录容量

规格名称	外径及记录面	记录容量
DVD-1	8cm 单面 1 层	1.4GB
DVD-2	8cm 单面 2 层	2.7GB
DVD-3	8cm 双面 1 层	2.9GB
DVD-4	8cm 双面 2 层	5.3GB
DVD-5	12cm 单面 1 层	4.7GB
DVD-9	12cm 单面 2 层	8.5GB
DVD-10	12cm 双面 1 层	9.4GB
DVD-14	12cm 双面 1 层+2 层	13.24GB
DVD-18	12cm 双面 2 层	17GB

表 9.8　DVD 格式

	再生专用			可以记录		
DVD 规格名	DVD 图像	DVD 声音	DVD-ROM	DVD-RAM	DVD-RW	DVD-R
物理格式	DVD ROM			DVD-RAM	DVD-RW	DVD-R
文件格式	微指令 UDF 及 ISO9660	微指令 UDF 及 ISO9660	UDF 及 ISO9660	UDF	UDF	UDF 及 ISO9660
应用格式	图像文件	声音文件	数据文件	数据文件及 VDD 图像记录	DVD 图像记录	

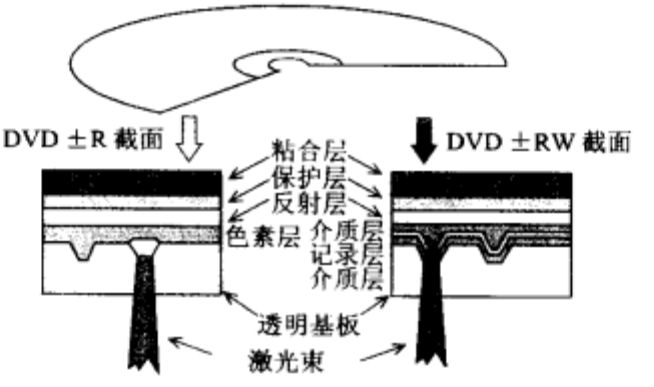


图 9.37　DVD±R 与 DVD±RW 的构造

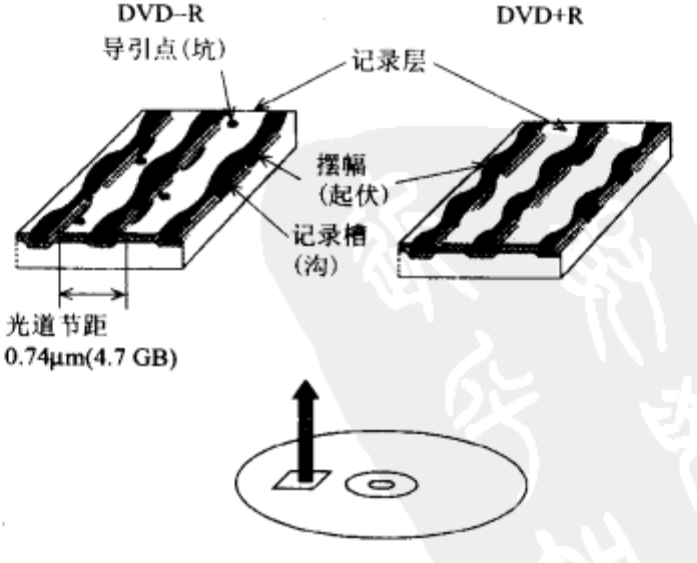


图 9.38　DVD－R 与 DVD＋R 的差别

11 传 真

要 点

传真是一种用通信线路传送文字、画面等静止图像的方法，传真机是从照片电传技术发展起来的小型轻便的图像传输设备。

解 释

传真的原理

图 9.39 示出传真机的基本构成。发送端用投射光对原稿进行扫描并读取反射光。如图 9.40 所示，当光投射到图像上时，其反射光被 CCD 或光电二极管之类的光电元件所接收，该反射光的强弱就被变换成电信号，该信号与同步信号一起送出。

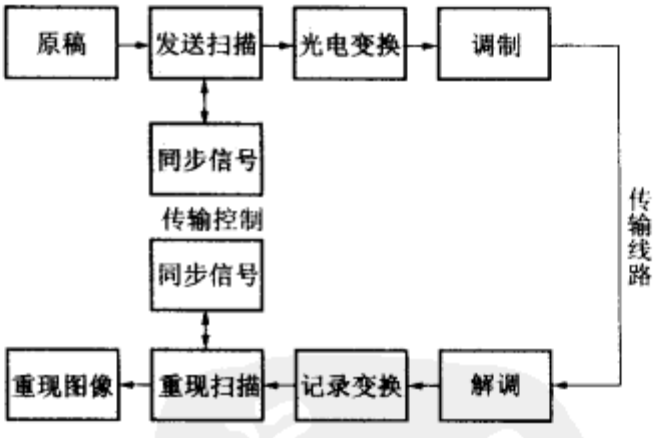


图 9.39 传真机的构成

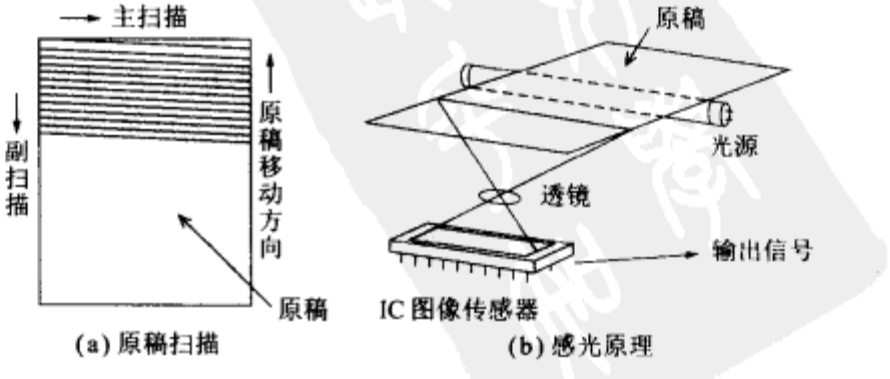


图 9.40 传真机的扫描

接收端由解调器从收到的电信号解调出原图像信号，送给记录装置，重现出与发送端相同的图像。

传真的机构与图像的发送与接收

电子扫描方式

平面**电子扫描方式**是传真扫描方法的主流。图9.41示出电子扫描式传真的机构。发送端配置着一排与原稿扫描幅宽相对应的半导体感光元件，由该感光元件来获取电信号。原稿由走纸机构按一定速度送入，从原稿上反射出来的光到达感光元件后便得到了与原稿亮度相对应的**图像信号电流**。电子扫描方向称为**主扫描**，原稿移动方向称为**副扫描**。

图像信号电流

主扫描　副扫描

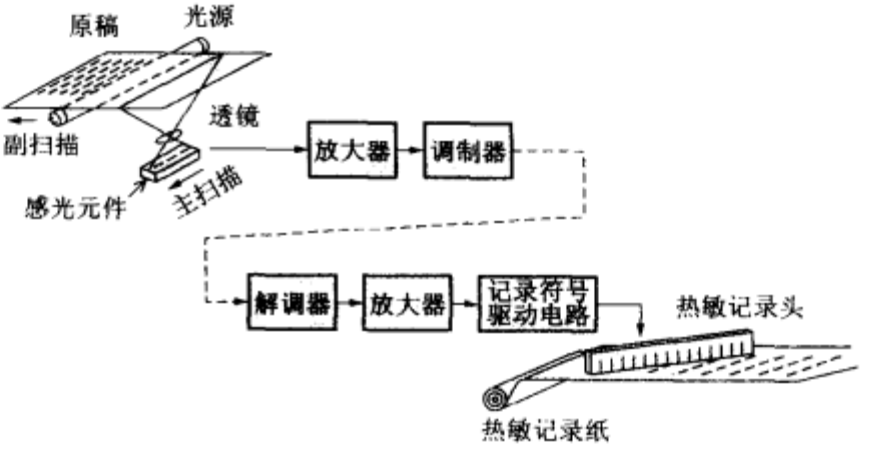


图9.41　电子扫描式传真

图像信号电流经通信线路送到接收端。一般情况下，通信线路大都是利用电话线路，而电话线路不能直接传送传真图像信号，因而采用将其调制在1900Hz左右的载波上，以调幅信号方式来传送。接收端有静电记录和**热敏记录**两种记录方式。在热敏记录方式中，走纸速度与发送端同步，走纸的同时，接收、解调、放大后的图像信号电流把重现图像记录在记录纸上。CCITT按照国际通信的需要，对传真的规格进行了如表9.9所示的分类。

热敏记录

现在，用户电话线路传真中，第3类(G3)是主流，它是将图像信号电流编码后以高速传输的模拟传真方式。

表 9.9 传真的分类

分 类	通信线路	传真信号方式	电传时间(一张 A4 纸)
第一类(G1)	用户电话线路	模拟传真	约 6min
第二类(G2)	用户电话线路	模拟传真	约 3min
第三类(G3)	用户电话线路	模拟传真	约 1min
第四类(G4)	公共数据线路	数字传真	约 4s

12　音频放大器

要　点

能不失真地将拾音器、CD唱机等输出的低频信号放大到所需大小的装置称为音频放大器。对于重放和放大音乐的装置，由于要求其输出更为接近原声，所以其电路是非常讲究的，这类放大器称为Hi-Fi(高保真)放大器。立体声放大器因为要重现立体声，所以它是将两个相同的音频放大器组装在一起的声频设备。

解　释

前置放大器
主放大器

音频放大器由**前置放大器**和**主放大器**两部分组成，如图9.42所示。前置放大器的作用是对来自CD唱机或录音机的微弱声音信号进行低噪声放大和音量音质调整，并向主放大器提供输入信号。主放大器提供驱动扬声器所需功率，其末级要求输出相当大的功率，所以采用功率放大电路。音频放大器的频率特性如图9.43所示，在20Hz～20kHz范围内应保持平坦，按其电路结构，也有从直流(DC)到20kHz以上具有平坦特性的放大器。此外，电路必须线性良好、失真小。

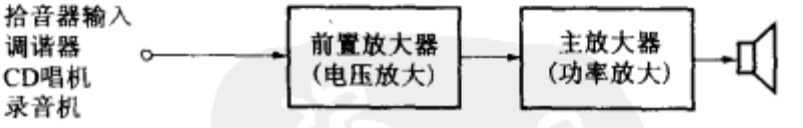


图9.42　音频放大器的组成

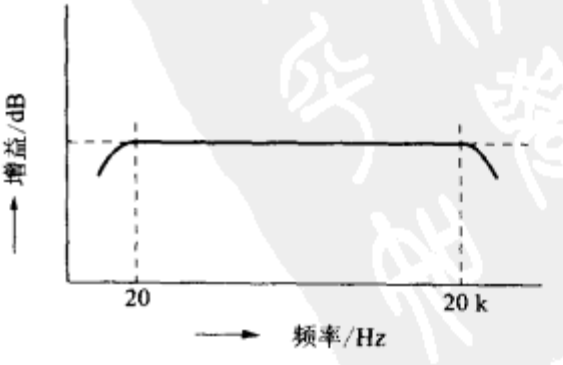


图9.43　音频放大器的频率特性

前置放大器

前置放大器由音调控制电路、电压放大器、输入切换电路等构成。音调控制电路是调整音质的电路，有 CR 型、NF 型等。图9.44所示为前置放大器的构成。

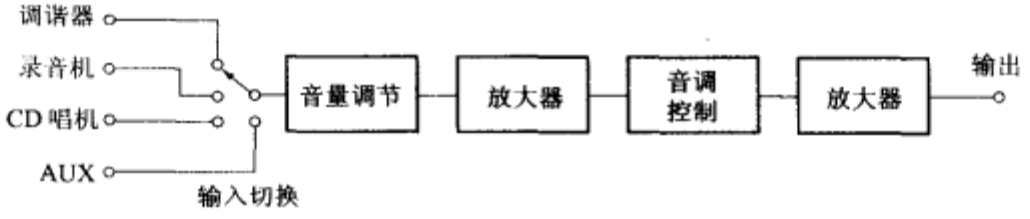


图 9.44 前置放大器的构成

主放大器

由于要得到大的输出，所以末级多采用 B 类推挽电路。当用晶体管或 FET 构成电路时，常采用如图 9.45 所示的 SEPP(Single-Ended Push Pull)电路。**SEPP 电路**的两个晶体管分别只放大输入信号的半个周期，而在输出端合成为一个信号。由于两个晶体管对负载来说是并联的，而对电源来说是串联的，所以能够连接阻抗小的负载，因此，它能不用输出变压器而直接连接扬声器，成为 OTL(Output Transformer Less)电路。

SEPP 电路

OTL 电路因其不用输出变压器，所以能够改善频率特性和失真率，也有利于小型化。

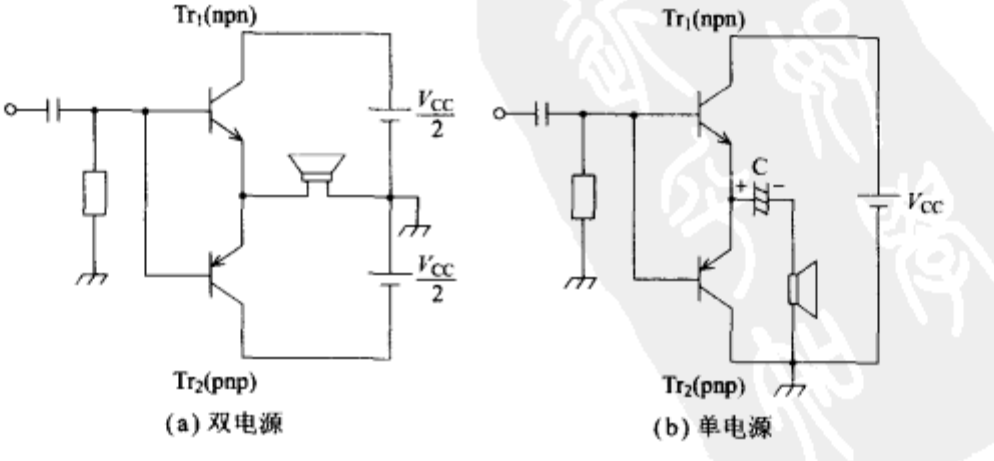


图 9.45 SEPP 电路

13　音频记录

要　点

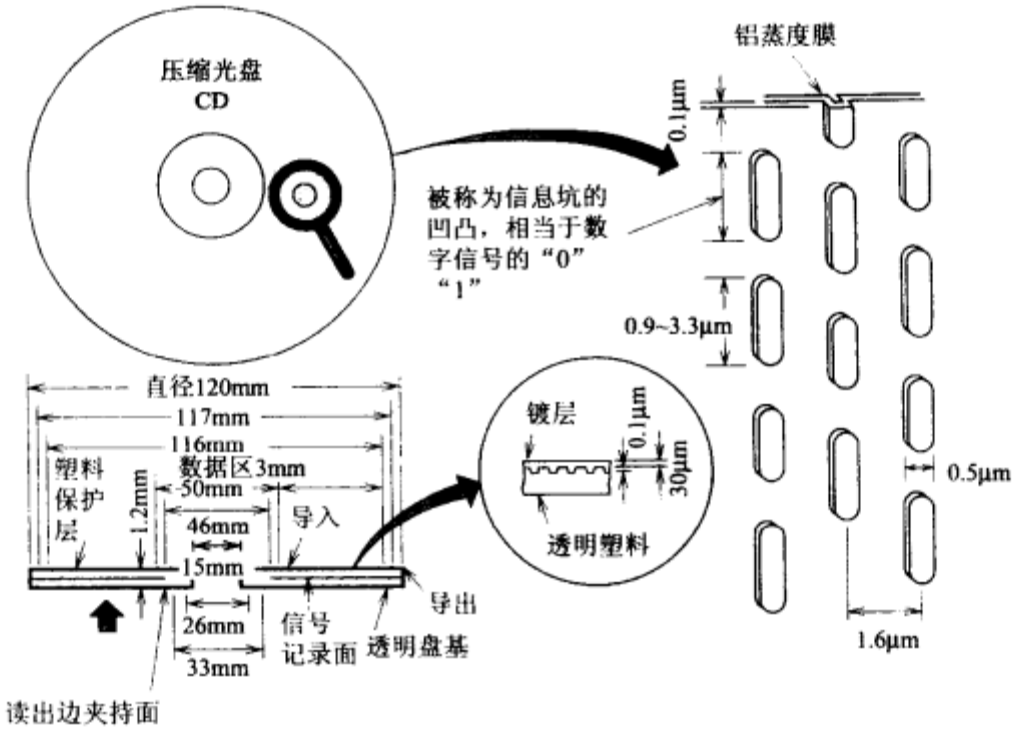
磁带录音机是直接以模拟信号的形式在磁带上记录语音信号的音频记录设备，而现在所用的录音设备，大都是先把模拟信号变换成数字信号，然后将其记录在CD(Compact Disk)、MD(Mini Disk)、DAT(Digital Audio Tape)、HD(Hard Disk)、闪存器(flash memory)等媒体上的数字记录设备。这类记录媒体的优点是检索、复制和编辑都很方便，并且由于采用了数字压缩技术，因而实际上增大了记录容量。记录的时候，首先由拾音器把语音或音乐变换成音频电信号，接着将这种模拟信号用模/数变换器(A-D变换器)变换或数字信号，然后再由写入装置将数字信号记录到媒体上。重放的时候，先由读取装置从媒体中把所记录的数字信号取出来，接着再由数/模变换器(D-A变换器)将其变换成模拟信号。

解　释

CD单放机

数字音频系统中最普及的是CD单放机。如图9.46所示，CD光盘是一种直径为120mm、厚度为1.2mm的非接触激光读取方式的记录媒体，数字化信息以称之为信息坑的深为0.1μm、宽为0.5μm、长为0.9～3.3μm的凹、凸槽的形式记录在铝蒸镀膜上。CD光盘之类的数字记录方式不能记录和解调直流成分，例如，当CD光盘的光道上持续为没有信息坑的状态时，就无法跟踪用光反射来取出信号的光检测器。为此，采用了一种EF调制(EFM)，它是一种按一定的间隔让“0”和“1”反转而去掉直流的变换方式。

记录在CD光盘上的数字信息的读取是由如图9.47所示的光检测器来进行的，光检测器由半导体激光器、光电二极管等构成。当半导体激光器发出的激光束碰到CD光盘上的信息坑时，反射光随信息坑的出现而发生变化，将这一变化量变换成电信号，便得到了已恢复的数字信号。恢复出的信号是14bit模型的信号，因而还要再把它解调为8bit的数字信号，再经过D/A变换，得到模拟信号。



规 格	内 容
采样频率	44.1 kHz
量化位数	16 bit线性量化
调制方式	EFM 8 bit →14 bit 变换
误码校正	交叉交织及里德·索罗门码

图 9.46 CD 光盘的构造和规格

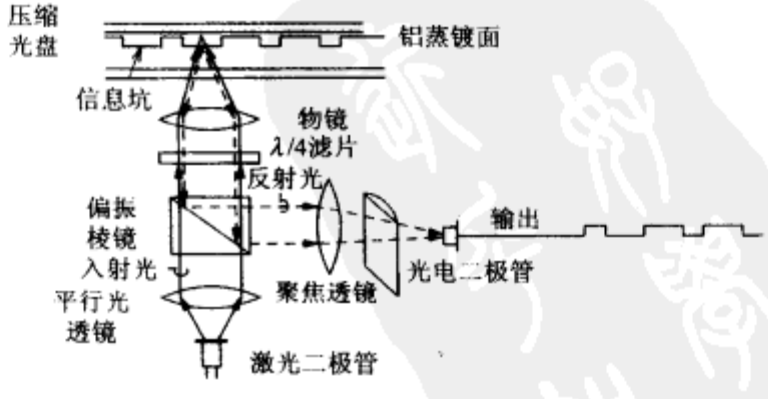


图 9.47 CD 光盘数据的读取

CD 单放机的基本构成和规格示于图 9.48 中。光检测器读出的数字信息经 EFM 方式解调、纠错解码信号处理及

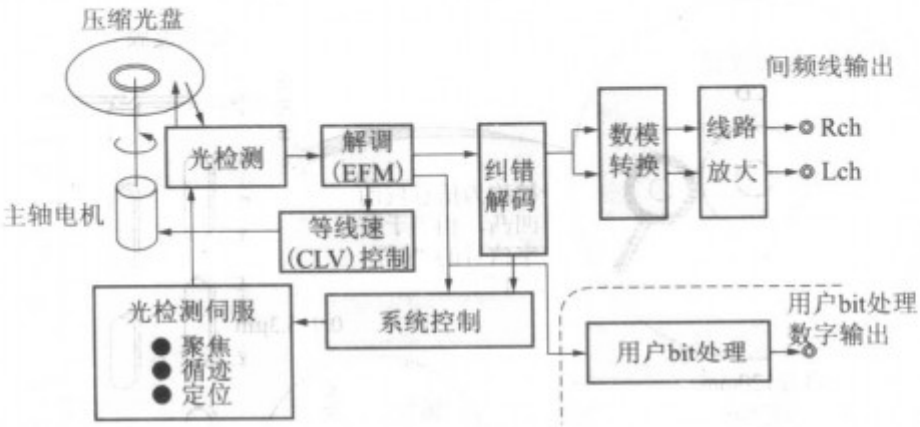


图 9.48　CD 单放机的构成和规格

D-A 转换，得到模拟信号。然后再通过线路放大器放大，重现原录制的音乐信号。

CD 单放机系统的优点在于检测头不接触 CD，因而不会磨损老化，也易于随机访问。此外，CD 单放机没有录音功能，所以其构造简单。

MD 单放机

MD 单放机与 CD 单放机一样，它也是数字式音频记录设备，二者的不同之处是 MD 单放机的记录媒体采用的是磁光盘(MD)。如图 9.49 所示，MD 是一种直径为 64mm，厚度为 1.2mm 的盘片，它装在一个带有快门的 72mm×68×5mm 塑料盒内，能以 400～1400r/min 的速度旋转。再生专用的媒体中，有的与 CD 一样，也是用信息坑来记录的，没有快门。

MD 的记录方式不是那种先抹后写的方式，而是一次旋转便同时抹去归数据并写入新数据的磁调制重写方式，重写次数可达 100 万次以上。抹去和写入的原理如图 9.50 所示，经过透镜聚焦成 1μm 大小的激光束，从 MD 盘片的一侧照射到盘片记录层上，使记录层温度达到 200℃以上，这时，由于温度已超过了居里点，因而记录层便失去磁性。另一方面，置于 MD 盘片另一侧的磁头则在记录层冷却过程中使之磁化，从而记录下信息。这种磁记录方式与其他磁记录方式的不同之处在于，由于记录层的温度不达到居里点以上，它的磁通量方向就不会改变，因而对外界磁通量具有很强的

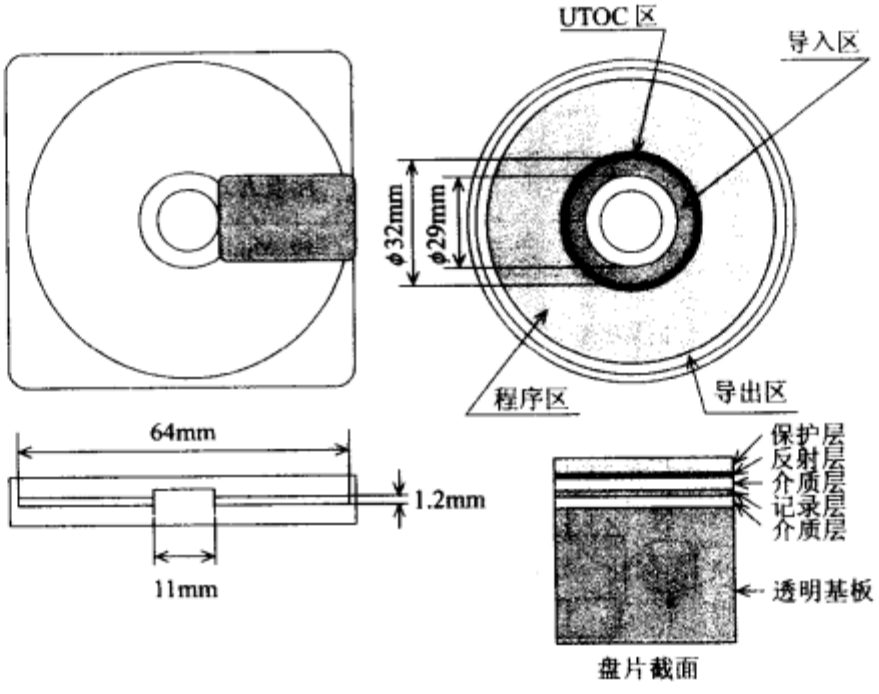


图 9.49 MD 盘片的构造

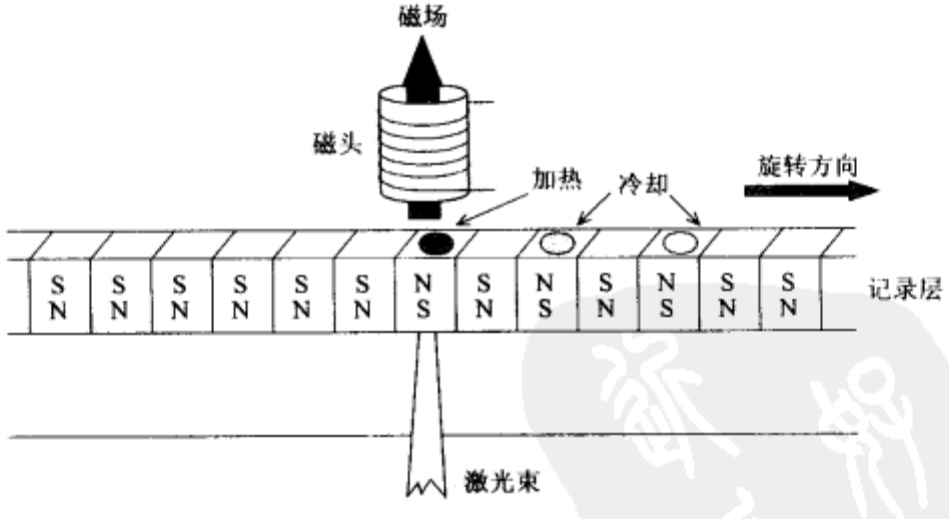


图 9.50 MD 盘片的记录原理

抗干扰性。读出时采用的是比写入功率小的激光束，当读出激光束照到盘面上时，反射光偏振面的变化即为记录层上所记录的信息。这是一种磁核效应，即反射光偏振面随着记录层的磁通量方向而产生微小变化的效应。与 CD 相比，MD 的记录容量约少 140MB，为了加长录音时间，其数据记录方式采用了 ATRAC 和 ATRAC3 压缩方式(参看表 9.10)。MD

单放机的基本构成如图 9.51 所示。

表 9.10　MD 的录音时间与记录方式(80min 的媒体)

记录方式	ATRAC 标准方式	ATRAC3(MDLP)	
		LP2 方式	LP4 方式
记录时间	约 80min	约 160min	约 320min

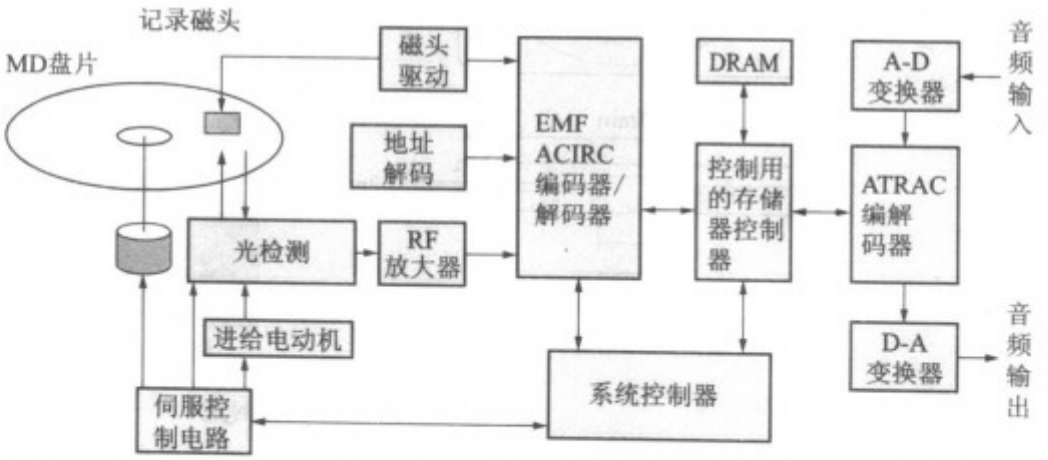


图 9.51　MD 单放机的基本构成

磁带录音机

如图 9.52 所示，磁带录音机由保证磁带平稳行走的送

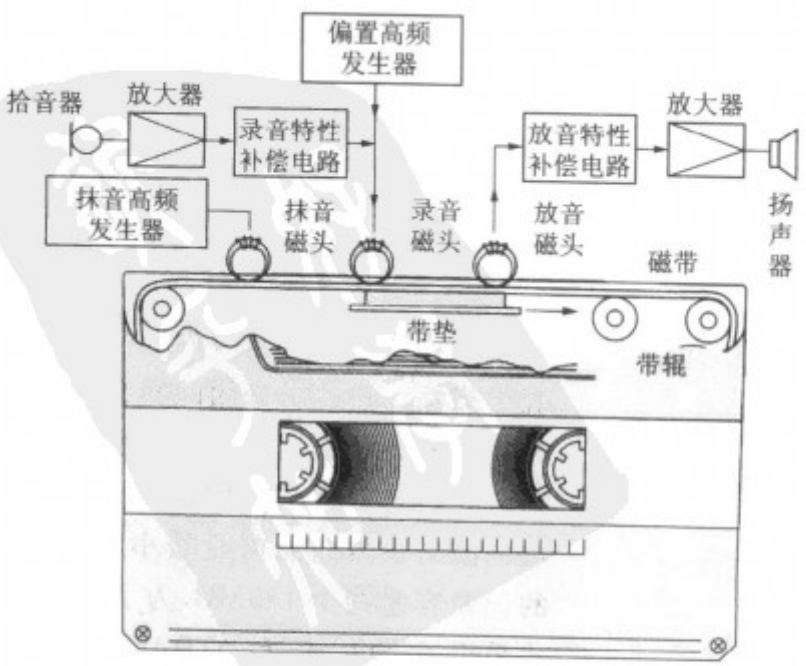


图 9.52　磁带录音机的构成

带机构、录音磁头、放音磁头、抹音磁头、放大录音信号的录音放大器、放大重放信号放音放大器、高频发生器等电子电路构成。磁带贴着磁头行走，磁头所产生的随着声音信号变化的磁通量便把音频信号记录到了磁带的磁性层中。

磁头是个电磁变换器，磁带录音机中所用的磁头有录音磁头、重放磁头、抹音磁头三种。多数情况下，放音磁头与录音磁头是兼用的。图 9.53 示出了磁头的构造。

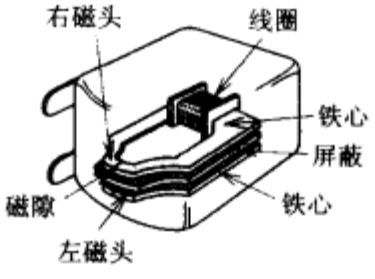


图 9.53　磁头的构造

录音采用的是交流偏置记录方式，它是通过将 30～200kHz 的高频电流与录音电流叠加在一起进行录音的。如图 9.54所示，高频磁通量所产生的剩磁消失了，只有与信号磁通量相对应的剩磁被记录了下来。这种记录方式具有失真小、线性范围宽、噪声小等优点。

抹音通常是通过给抹音磁头加上高频电流来进行的。抹音磁头的磁隙比放音磁头的磁隙宽一些。

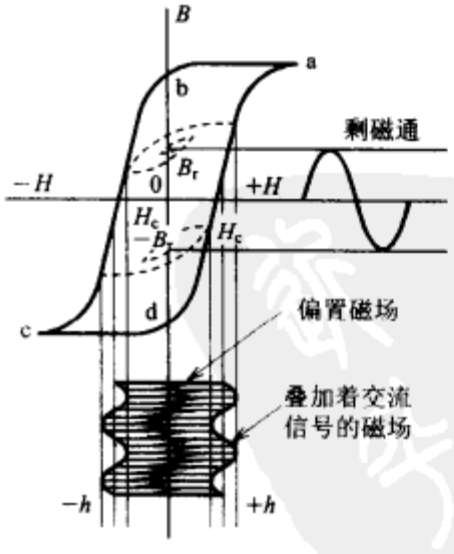


图 9.54　交流偏置记录方式

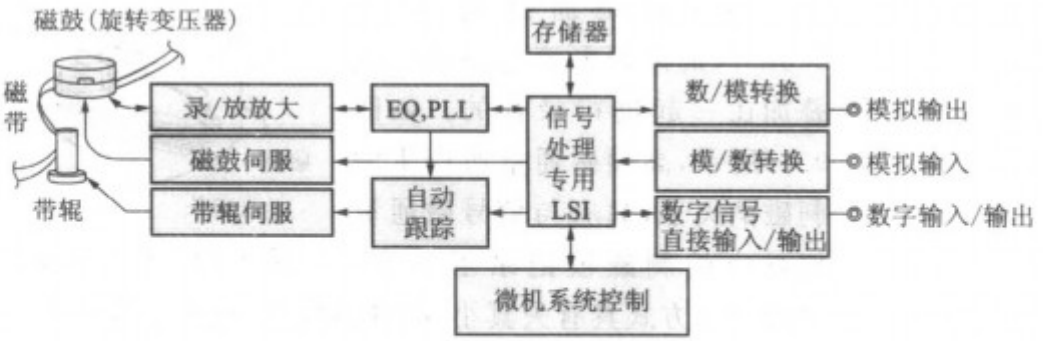
DAT

DAT(Digital Audio Tape Recorder)与 CD 一样，是能够将音乐之类的模拟信号变换为数字信号来进行录音和重放

的数字音频设备。为了便于录音，记录媒体采用了装在专用盒子里的磁带。

DAT分为固定磁头式的S-DAT和旋转磁头式的R-DAT两种形式。这里介绍R-DAT。

DAT的磁记录部分由与声频盒式磁带相近的3.81mm磁带和直径为30mm的旋转磁头构成。DAT的基本构成和规格示于图9.55。标准规格为采样频率48kHz、量化比特数16bit的标准模式，此外还备有其他模式可供切换选择。



(a) 构成

	录放型		重放专用型
	标准	任选3	正常跟踪
采样频率/Hz	48k	32k	44.1
量化位数	16	12	16
通道数	2	4	2
磁带速度/(mm/s)	8.15	8.15	8.15
磁鼓转数/(r/min)	2000	2000	2000
用途	标准记录	长时间用	重放专用

(b) 规格

图9.55 DAT的构造和规格

其工作原理是，首先将模拟信号经采样、量化，使之变为数字信号。其次用纠错编码电路加上误差校正码，进行DAT的调制方式8-10变换，以图9.56所示格式用旋转磁头记录到磁带上。为了能判断记录到磁带上的"0"和"1"的情形，所以不要加录音偏置。

重放原理是先把来自磁头的记录信息恢复成数字信号，然后以与CD相同的原理重现模拟信号。

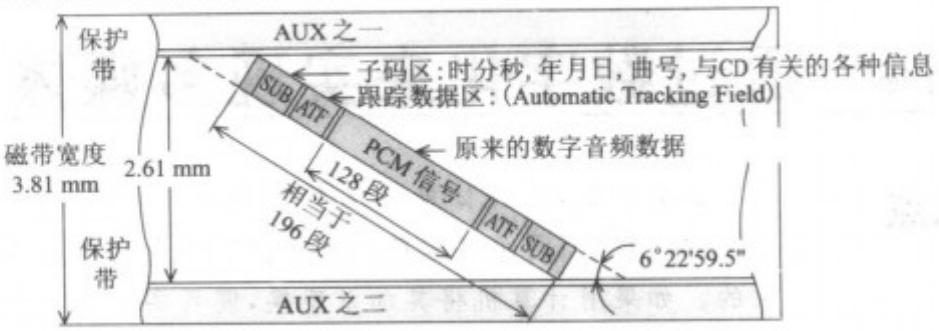


图 9.56 DAT 的格式

相关知识

◆ EFM(eight to fourteen modulation)变换

EFM 是 CD 的调制方式。以数字信号的 8bit 为单位变换成 14bit 的模型。表 9.11 中示出其变换的例子。

表 9.11 FEM 变换举例

	数据	通道位		数据	通道位
0	00000000	01001000100000	64	01000000	01001000100100
1	00000001	10000100000000	65	01000001	10000100100100
2	00000010	10010000100000	66	01000010	10010000100100
3	00000011	10001000100000	67	01000011	10001000100100
4	00000100	01000100000000	68	01000100	01000100100100
5	00000101	00000100010000	69	01000101	00000000100100

◆ DVD 的可重写次数和寿命

DVD 的可重写次数和寿命的规格如表 9.12 所示。

表 9.12 DVD 的可重写次数和寿命

种 类	可重写次数	寿 命
DVD−RW	1000 次以上	10 年以上
DVD+RW	1000 次以上	
DVD−RAM	数万次	

注:表中数据是通常使用条件下的数据。保存场所若为高温多湿的情况下,达不到这个数据。

14　通过数字化来实现多媒体

要　点

顾名思义，多媒体就是多种信息形式的媒体。实际当中，文字、声音、图像等信息通常是按照各自的信息形式来记录的。如果用计算机将其加以变换，便可实现各种信息媒体形式的融合，进而还可以简单地利用 Web 进行信息交换，并且不会使数据劣化。

解　释

数字化问题

声音信号和图像信号的数字化可以通过在录音机、录像机和数码照相机等设备中配以微处理器等小型数字处理装置的办法，经过实时模/数变换（A-D 变换）来实现，并且可以进行压缩记录。再生时则需要按相反的处理过程进行解压缩和数模变换（D-A 变换）。各个领域中的信息（数据）形式是不同的，音乐、电影等的数字数据可以通过复制的办法获得，但应使复制数据变成与主数据一样的数据且不产生劣化，而这会涉及著作权问题。从这点上来说，在 Web 上配备信息也并不容易，虽然有方便之处，但有其必须解决的问题。

多媒体的数据形式

音响（声音）数据主要采用 MIDI 形式、MP3 形式、WAVA 形式及 RMI 形式等。

电影（活动图像）数据主要采用 MPEG 形式、Quick Time 形式、AVI 形式、Real Video 形式及 Shokwave Flash 形式；图画（静止图像）数据主要采用 JPEG 形式、BMP 形式、GIF 形式及 PNG 形式。

文本文件数据、应用文件数据（用日文汉字处理机所制作成的数据等）、执行文件数据等可以采取 ZIP（Win ZIP）形式和 LZH 形式在 Web 上操作。

这里所操作的数据形式是从减小 Web 上的传输时间和记录容量来考虑的，实际当中，它天天都在发展变化着。

相关知识

◆ **MIDI**

MIDI(Musical Instrument Digital Interface)是根据JMSC(AMEI)和MMA所制定的数字化音乐规格,它用于把乐谱的内容指定成音调、音程、声音的大小和长度、演奏乐器等数据。数据形式以GM(General MIDI)为标准规格,又追加了在GM基础上扩展成的第二级GM和面向便携电话的GML(General MIDI light)。

◆ **MP3**

MP3(MPEG-1 audio layer-3)是MPEG中的数字化声音格式。与WAVE形式相比,它的压缩率可达1/11,但压缩率一高,音质就下降了。同样,MP1和MP2也有它的规格,其压缩率分别约为1/4和1/7。

◆ **WAVE**

WAVE是Windows下的声音数据标准保存形式,其压缩方式没有规定,通常采用不压缩的PCM方式和ADPCM(自适应差分PCM)方式。

◆ **RMI**

RMI(RIEF MIDI序列)是在通常的MIDI文件上附加了乐器和音阶等信息(RIEF片段)所形成的扩展文件。

◆ **MPEG**

MPEG(Moving Picture Experts Group)是ISO标准的图像数据压缩方法规格,它又分为MPEG-1(MPEG phase 1)、MPEG-2(MPEG phase 2)、MPEG-4(MPEG phase 4),其应用情形如表9.13所示。图9.57所示为MPEG的相互关系。

◆ **Quick Time**

Quick Time是Macintosh标准图像(活动图像)文件形式,它用于数码照相机的活动图像等,其压缩性能好,但图像质量差。

◆ **AVI**

AVI(Audio Visual Interleaving)是Windows标准图像(活动图像)文件形式。

◆ **Real Video**

Real Video是Real Net works公司开发的图像压缩方式的图像文件。它可以使用流动技术(边下载边再生),因而能够从Web上现场转播。

表 9.13　MPEG 的传输速率及应用实例

		传输速率	内容	应用实例
MPEG1		~1.5Mbit	以 CD-ROM，ISDN 中的应用为目的，对声音编码也有规定	CD-ROM ISDN
MPEG2	High	80Mbit	水平像素数 1920，垂直像素数 1088，帧频 60	·HDTV·BS 数字广播·地面波数字广播·DTV
	High-1440	60Mbit	水平像素数 1440，垂直像素数 1088，帧频 60	
	Main	15Mbit	水平像素数 720，垂直像素数 480，帧频 30	·DVD·CS 数字广播·DVB(欧洲 DTV)·Direc TV
	Low	4Mbit	水平像素数 352，重直像素数 240，帧频 30	
MPEG4		10Kbit	用于便携式终端设备，是低传输速率所用的压缩技术	便携式终端设备，移动体通信

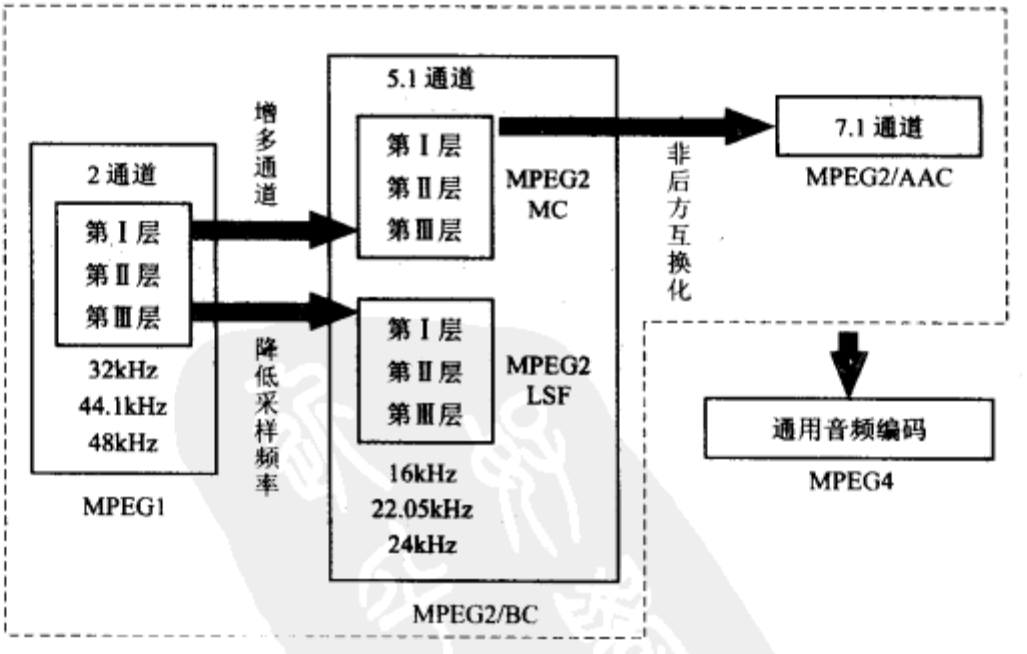


图 9.57　MPEG 的相互关系

◆ Shokwave Flash

Shokwave Flash 是 Macromedia 公司所开发的文件形式，它能够抽出动画片的张数来加以传送，并在接收侧生成所抽出的画片。

◆ **JPEG**

JPEG(Joint Photographic Experts Group)是对彩色静止图像进行压缩和解压缩的 ISO 规格,它又分为两类,一类是可逆编码方式(压缩率为数分之一);另一类是以 DCT(Discrete Cosin Transform:离散余弦变换)编码方式为基本方式的非可逆编码方式(压缩率为数十分之一)。JPEG 的分类如图 9.58 所示。

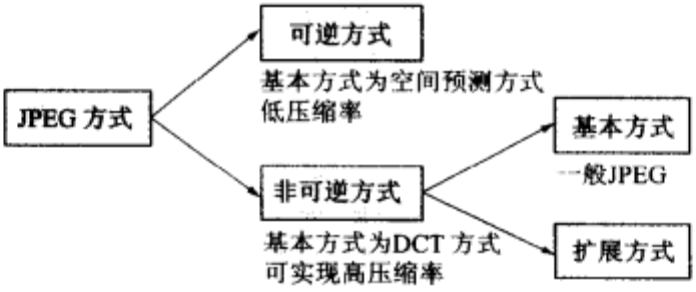


图 9.58　JPEG 的分类

◆ **BMP**

BMP(bit map)是 Windows 所支持的标准图像(静止图像)形式,基本上是按不压缩文件来处理的。

◆ **GIF**

GIF(Graphic Interchange Format)是作为 Compu Serve(美国个人计算机通信网业务)数据交换而开发的图像形式,它是一种能按 256 种颜色来保存图像数据的方式,并且有动画 GIF、透明 GIF 及交错 GIF 等扩张形式。

◆ **PNG**

PNG(Portable Network Graphics)是按照 GIF 使用金问题来开发的,能进行全彩色无失真压缩。每个像素能按 RGB 各 16bit 来处理,还能指定透明度和 γ 校正参数。

◆ **ZIP**

它是一种已压缩数据的文件形式,文件的扩展因子上带有".zip"。它有自己解压缩的形式,能在执行的同时解压缩。

◆ **LZH**

它是用 LZH 的压缩和解压缩软件来进行压缩的形式,文件的扩展因子上带有".lzh"。它有能把多个文件和文件夹归并为一个文件的档案库功能。

15 计算机图像制作

要 点

计算机图像制作通常称为GC(Computer Graphics),现在已是常用技术了。利用这一技术能够在计算机上加工制作照片和电影等,特别是在电影制作方面,只要有高级硬件,再花费一定的时间,便能够制作虚构出来的电影和具有特殊效果的镜头场景。可以说,它是人类所掌握的最新表现手法。

解 释

计算机图像制作系统的构成

个人计算机的CPU处理速度已经有了飞跃性进步,存储器的容量也随着价格的降低而大容量化了。只要有安装了高性能图像卡的个人计算机和视频摄像机、图像扫描仪、数字照相机等输入装置,就能够读入图像数据和进行数值处理(利用数学模型处理)。

二维计算机图像和三维计算机图像

制图之类的平面图形可以用二维坐标系(*XY*平面)来表示,用二维坐标系表示的计算机图像称为二维计算机图像。能够把所要显示的物体在计算机上表示成有立体感的图像,就称为三维计算机图像。

线构架模型

线构架模型就是只用物体轮廓上的点和连接这些点的棱线来表现物体形状的计算机图像。这种图像的构架面内数据都被省掉了,因而具有数据量少和易于处理的优点。

曲面模型

这种模型是在线构架模型上增加了面的概念来表示物体形状的,隐藏在图形背面的那些部分表示不出来,只能采用阴影处理的办法得到写实性表示。

体模型

它是一种从表现物体内部状态的角度来考虑的模型。利用这种模型制作的计算机图像,能够显示物体的任何截面图形。体模型是从CAD/CAM领域发展起来的计算机图像模型。

题外话

谁能在下一代的DVD竞争中取胜

从1975年索尼公司开始销售家用VTR的时候起，声像记录设备便形成了索尼公司的β型VTR与胜利公司的VHR型VTR之间的竞争。索尼公司曾经在销售VTR之前提出过与日本胜利公司及松下电器公司统一制定VTR规格的建议，但没有被采纳，结果，日本胜利公司推出了VHS方式，而索尼公司推出了β方式。β方式在图像质量等性能方面比VHS方式好，但制造成本高。松下电器公司从制造成本的角度考虑也采用了VHS方式。这样一来，家电产业界在VTR的生产销售上便形成了两大阵营，一方是β规格，集结了索尼、东芝、三洋电机、日本电气、爱和、先锋等公司；另一方是VHS规格，集结了日本胜利、松下电器、日立制作所、三菱电机、夏普、AKAI等公司。在这次竞争中，由于VTR本体价格便宜等因素的优势，VHS方式的售出台数超过了β方式，与之相伴随，VHS方式在视频软件方面也超过了β方式，于是，VHS方式生存了下来。

下一代的DVD竞争将会发生在蓝光光盘与HD-DVD之间。双方的阵营已经明朗化了，蓝光光盘一方的阵营将包括松下电器产业、索尼、夏普、厚利得、帕卡德、苹果等公司，HD-DVD一方的阵营将包括东芝、NEC、三洋电机、微软、IBM等公司。蓝光光盘的记录容量比HD-DVD的大（当前为27GB，有可能达到50GB），但与现行的DVD没有互换性。如果单从个人计算机的角度来考虑的话，HD-DVD将会取胜，但是，最后的结果还得看硬件价格会给销售份额带来多大影响（见图9.59）。毫无疑问，第二次视频媒体战争已经开始了，究竟会鹿死谁手，让我们拭目以待吧！

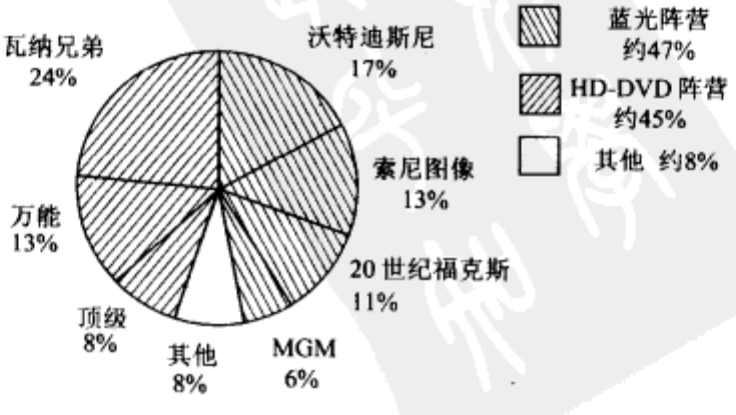


图9.59 按供应公司划分的下一代DVD销售份额（2005年4月至今）

题外话

音频设备的待机功耗比例竟然如此之大

现在，电视机、录像机等家用电器都具有遥控功能，只要按一下遥控器，设备的电源立即就能接通。为了让设备具有遥控功能，设备中必须有一部分电路始终保持通电状态。这种状态下设备所消耗的功率称为“待机功耗”。待机功耗的大小随设备种类的不同而不同，甚至同一型号的设备也有待机功耗并不相同的情况。

大多数人都只图方便，不愿意为反复地开关电源而费事。殊不知待机功耗并不是个小数，等到知道音频设备的待机功耗是最大功耗的70%时，才大吃一惊。

录像机的待机功耗比例与录音机差不多，最大功耗约20W，待机功耗为14W左右。CD无线电收、录两用机的最大功耗为27W，待机功耗为15W，比例约为56%，也是个不小的数字(引自东京电力公司节能推进部资料)。也许您原以为待机功耗很小，不过，音频设备平时还是关掉电源为好。此外也要知道，一般家庭的全部用电中，大约有10%是被待机功耗白白浪费掉了。

题外话

向国民广泛开放电波应用的日子

6月1日是“电波日”。这个日子是日本邮政省(即现在的总务省)于1951年制定的，而制定电波日的来历则在于前一年施行了电波三法(电波法、广播法、电波监理委员会设置法)。

按照这一法律，此前一直由政府掌管的电波应用，开始广泛向一般国民开放。电波日也就是为了纪念这件事而设立的，其目的在于促进国民对电波科学知识和相关企、事业的认识、普及和提高。每年的这一天都要举行表彰仪式，对于为电波技术发展作出贡献的个人和团体给予褒奖。

此外，6月1日到6月10日的十天时间称为“电波应用保护旬”，法务省针对扫除不法无线电台和保护电波应用者权益问题，在全国范围内举行关于电波法令的宣传活动。

6月1日这一天还与无线电广播有关，它也是1935年NHK开始用短波向海外播送无线电广播的日子，称为NHK国际广播纪念日。

第10章

各种电子技术应用系统

● 责任编委
福田　务
● 执　　笔
福田　务(1～3,6,8～13)
猪狩一三(4,5,13)
田中龙弥(7)

人们现在的生活环境，与以前相比，通信、医疗、交通等各方面都正在变得格外地便利与舒适。这些都源于电子技术的进步对工业的支持。

本章中，作为电子技术应用系统，主要介绍激光加工、Suica卡与自动剪票机、全球卫星定位系统（GPS）、航空交通管制、计算机断层成像等具有代表性系统，并对相关的电子技术应用装置也进行了一些介绍。

1　等离子体放电现象及其应用

要　点

固体、液体、气体是人们熟知的物质三态，等离子体可说是物质的第四种状态，它是高度电离了的气体。等离子体与辉光放电、电弧放电、激光等有密切关系，它们在所有的工业领域都有所应用，近年来的电子计算机和其他电子设备，其发展背后就有等离子体的重要作用。

解　释

等离子体

等离子体

高度电离了的气体称为**等离子体**。通常，如果给气体进一步加上高能量，气体原子里的电子就会被剥离，气体就变成了存在着相同数量的离子和电子的状态。这种状态称为**电离气体**，它在电气上是中性的。产生电离气体需要一个称为“激发”的过程。众所周知，电子围绕原子核旋转的轨道具有各自的固定能级，因此，要把电子从原子中拉出去，就需要有比各个能级高的能量。也就是说，通过从外界把某个能量施加给电子，就能够把低能级轨道上的电子移到高能级轨道上去。移到高能级轨道上的电子还会降回原来的低能级轨道上来，这时，两个轨道的能量之差就变为光能而辐射出来。荧光灯和霓虹灯的发光就是这个原理。

电离气体

能使原子或分子产生电离或激发的方法有好几种，一般情况下，电离都是电子、离子、原子、分子在受到撞击时产生的。电子时而受电场的吸引而加速，时而在磁场的作用下做旋转运动，这种对电子的刺激导致碰撞的频繁发生，从而引起更多的电离和激发。由于电离状态的等离子体具有离子和电子，因而它能够导电。

辉光放电

弱电离等离子体

荧光灯和霓虹灯的发光称为**辉光放电**，辉光放电所产生的等离子体密度很低，称为**弱电离等离子体**。当接通荧光灯的电源时，荧光灯中的气体（氩气和水银气）因电离而产生离子和电子，离子受正电极的吸引而加速，电子受负电极的吸引而加速。在玻璃管内，电子、离子、原子、分子激烈碰撞，这种碰撞不断地重复，原子和分子的激发也就不断地重复，这

便是荧光灯发光的原理(见图 10.1)。

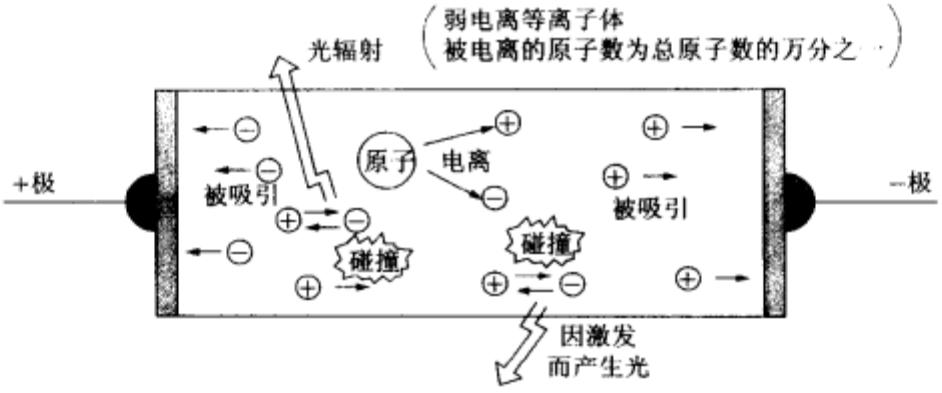


图 10.1　荧光灯和霓虹灯的辉光放电

电子的质量最轻,它在荧光灯中的运动最激烈,如果用温度来表示这种电子的能量,其温度高达数万度。电子温度高达数万度,周围的物体却并未被熔化,其原因在于电离出的电子数只有总原子数的万分之一,也就是说,荧光灯中具有高动能的移动电子数目是非常少的。由于它的等离子体密度低,所以称为处于"弱电离"状态。

等离子体的应用

集成电路是促进计算机和电子设备迅速发展的重要器件,制造集成电路时常常要在基片上附着或削掉金属材料(或绝缘材料),其工艺的精度要求高达 0.1‰mm。这种工艺可以用等离子体来实现。当等离子体中的离子和称为电离基的激发态原子位于负电位附近时,它们势必会被负电位有力地拉过去。由于离子比电子重得多,撞上去时就会把被撞的表面削掉。另外,激发态的原子能够与某些表面产生化学反应而形成薄膜。最近的集成电路制造工艺中,所采用的

高密度等离子体

高密度等离子体的离子密度已经比弱电离等离子体高了 100 倍。

为了产生高密度等离子体,可以用电磁波进一步激活电子的运动,从而促使电离的加剧。

电弧放电是比辉光放电更强的电离,其等离子体称为"强电离等离子体"或"热等离子体"。电弧放电的气压比辉光放电的压力高,在大气压下也可以进行。一般的电弧放电

能在正、负电极之间产生，放电电流可达数十至数百安培以上。如此大的电流流过金属时，所产生的热量能够迅速地把熔点很高的金属熔化。

等离子体喷射

“电弧熔射”和“等离子体熔射”是利用它们所产生的高温来加热金属材料并使之熔化在机械零件表面上的方法。举例来说，将两个相互靠近的铝线分别接在正、负电极上，当电极上加有高电压时，铝线之间就会产生电弧放电，铝线端部就会熔化。这时，如果把燃气或空气强烈地向端部吹去，熔化了的铝就会成为雾状向外喷出。这种将熔化了的金属微粒吹附到机械零件上的方法称为**等离子体喷射**。由于等离子体熔射是在高温高速等离子体中把粉体熔化后通过喷嘴送到材料表面来形成被膜的，因而所制成被膜的耐热、耐酸、耐摩擦性更好。

等离子体喷射

利用电弧放电所产生的等离子体有非转移型和转移型两种(见图 10.2 和图 10.3)，等离子体喷射属于非转移型。与此相反，转移型不进行加热，而是将加工对象材料本身作为负电极，并通过给它与正电极之间加上电压来放电的。转移型既可以利用电弧放电来进行金属切割，也可以用来进行焊接。

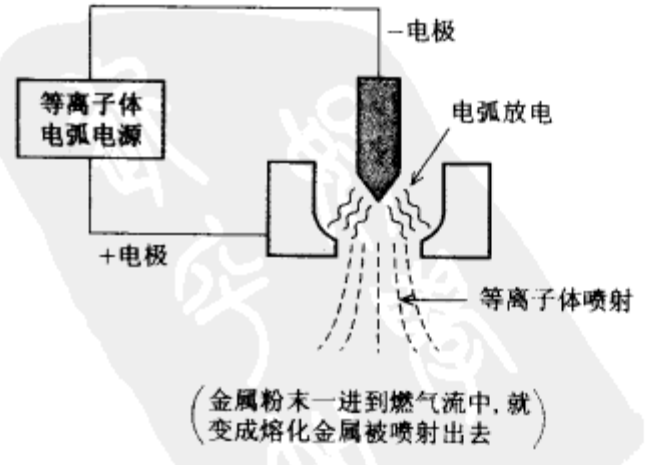


图 10.2　非转移型

等离子体的特点

上述的等离子体具有以下特点：①它们是热容量大的热

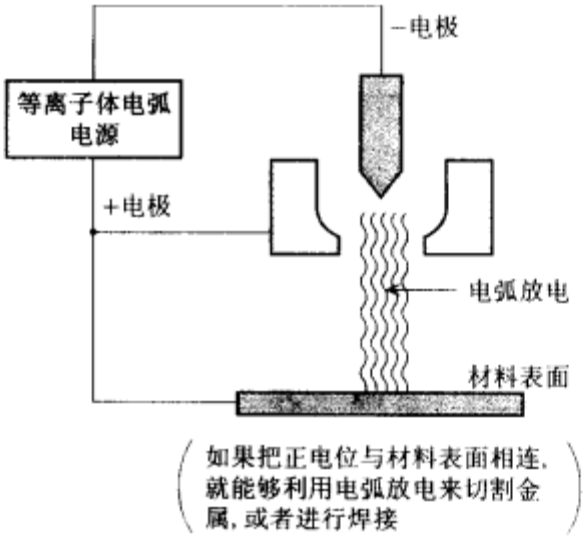


图 10.3　转移型

源。②氧化、还原等可以采用所有的燃气。③等离子体中的离子、电离基等高能状态的化学变化都可用于反应。④能进行电磁场控制。

激　光

以前，激光发生源采用的是放电方法。1960 年，美国最先采用红宝石晶体产生出了激光，第二年又采用氦、氖气产生出了激光。电磁波的特点取决于它的波长、振幅和相位，电子从高能级轨道降回低能级轨道时所发出的光波因其跃迁时间千差万别，仍然是并不集中的混杂光。激光是通过人工的方法使光辐射按照相同的波长和相位来产生的，为此就要用到等离子体。激光的特点是它的方向性非常好，能量能高度地集中于一个点。

现在，信息与通信技术、材料加工、测量等众多领域都广泛使用着激光。

2　激光加工

要　点

激光在光通信、医疗、精密加工等领域引起了一股技术革新热潮。本章对激光基础及作为其应用的激光加工进行介绍。

解　释

激　光

在超级市场的收款处，用激光照射印在商品上的条形码，即可记录商品的价钱。而舞台上，也可对重要情节使用红色或蓝色的激光进行渲染。激光就是这样经常用在人们身边。激光到底是什么？

激光

激光(laser)是 light amplification by stimulated emission of radiation 的字头缩写。意为“受激辐射的光放大”。激光不同于自然光、照明灯光及其他场所所用的光，它与利用电子管或晶体管所产生的无线电波具有相同的性质。

相干

激光是一种**相干**电磁波，它具有极其优良的方向性、单色性、相干性，能量高度集中，亮度很强。所谓相干光，指的是激光的光波并不是杂乱无章的，而是整齐排列的波列。方向性说的是激光具有波束细而不发散的性质。普通光含有各种颜色的可见光，复合后成为白光，而激光是单色光。相干性指的是，光波的峰与峰相遇时光照增强而变亮、峰与谷相遇时相互抵消而变暗的性质。激光因为具有上述这些性质而广泛应用于精密加工、医疗、通信等领域中。

激光加工

激光的一个主要应用是激光加工。由于激光集束后获得的能量密度很高，能够熔化或汽化各种材料，因而可以用来进行切割、打孔、焊接等加工(见图 10.4)。

激光加工，与利用电子流的电子束加工相比，在能量密度、非接触加工等方面很相似，但是激光加工可在空气环境中进行而无需真空，应用非常方便。而且由于激光是光，利用棱镜和反射镜即可很容易地对其进行操作。用于加工的

固体激光
气体激光

激光有**固体激光**和**气体激光**，前者主要用于打孔，后者则用于切割、焊接、热处理等(见图 10.5)。

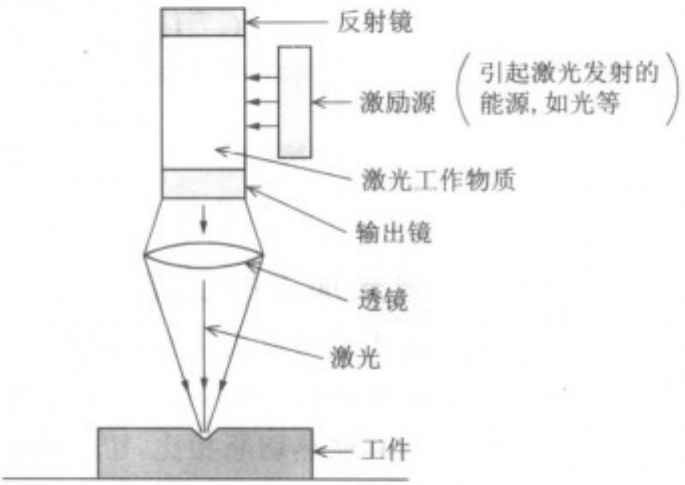


图 10.4 激光加工

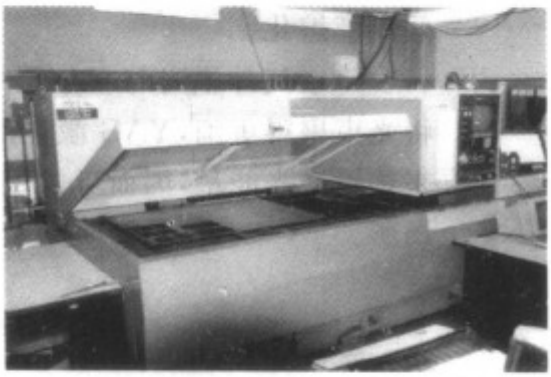


图 10.5 激光加工机(山崎 MAZAC)

固体激光使用的传统工作物质是合成红宝石，红宝石的红色激光来源于铬原子吸收光能后所发出的光(见图 10.6)。红宝石激光对于在大型金属薄板上打小孔之类的加工非常有效，但是其输出功率有限，且中间需要一定的冷却时间，因而现在最普遍采用的是**YAG 激光**。YAG 是钇铝石榴石(yttrium，aluminium，garnet)的英文字头缩写。YAG 发出的强力激光束因其热传导性能好而特别适于精密加工，但是能量利用率较低。

YAG 激光

CO_2 气体激光是材料加工中所使用的典型气体激光，它的输出功率和效率都很高，就连超强合金、耐火合金都可以切断。

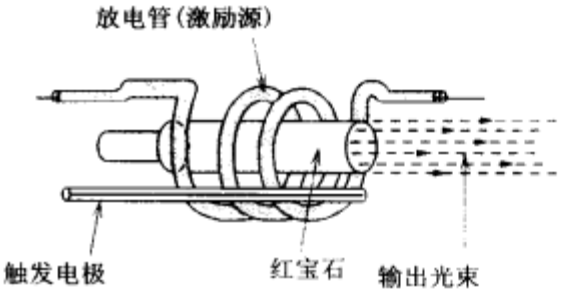


图 10.6　红宝石激光的发射

激光加工的优点

激光也可以用于材料的连接及表面处理。特别是其能量密度很高(1MW/cm^2 以上),因而可以灵活有效地进行切断。与其他热切断相比,切断速度非常快,精度也高,这是由于其很适合于计算机加工控制的缘故。也就是说,工作台的移动和在工作台上控制激光束都很容易,因而可以使材料瞬间局部熔化。

CO_2 气体激光与 YAG 激光相比,其优点是聚光时可以将光束聚得更细,YAG 激光的优点则是可以通过玻璃纤维来传输激光能量,因而可以用于由机器人来进行工件切割的场所。

相关知识

◆ 电子束加工

将高压加速的电子聚成束,用来轰击材料时,电子所带有的动能大部分会变成热能。利用这种热能来熔化材料或者使之蒸发掉的加工方法,称为电子束加工。电子束的位置、大小、强弱能够精确地控制,因而可以用于细微加工。但是必须在真空中进行加工,对于产生的 X 射线也要进行安全防护。

3 电子显微镜

要 点

电子束可以在电场或磁场中加速、聚集，因而可以与光一样有透镜聚焦作用。利用这种功能所制成的设备称为电子显微镜，本章对其原理与功能进行介绍。

解 释

电子显微镜的原理

分辨力

光学系统能够区分被观物体上邻近两点差别的限度称为**分辨力**。人眼的分辨力大体上为 0.1 mm，光学显微镜的分辨力大约可以高到 0.000 2 mm 的程度。也许有人会认为，只要增加光学显微镜中透镜的级数，不管多么细微的东西就都可以观察到。但实际上是不行的，过多的透镜反而会使观察物变模糊。光学显微镜的分辨力可随光波波长的变短而增强，但即使使用波长很短的光，其分辨力最高也只能达到 0.000 2 mm(2000Å，1Å$=10^{-8}$cm)的程度。

在电子显微镜中，电子束来代替了光，电子束的方向可以用电场或磁场来控制，使之产生透镜聚焦效果，从而使放置于电子束路径上的试件的像可以被放大。高速度加速的电子束的波长极短，因而分辨力可以提高。例如，用 50kV 加速的电子束代替光时，分辨力可以达到 30Å，有效放大倍数可以是光学显微镜的几十倍。

电子显微镜的种类

电子显微镜一般分为透射型和扫描型。

透射电子显微镜

透射电子显微镜(TEM：Transmission Electron Microscope)是利用透过试件的电子束强度把试件的材料结构描绘成平面图像中的浓淡变化。其构成与光学显微镜的原理非常相似。

电子显微镜的组成，从显微镜上部开始，有电子枪、聚焦透镜照射系统、试件室、物镜成像系统及照相机等(见图 10.7)。

电子束与气体分子碰撞时会被散射而改变其行进方向，所以电子显微镜的镜筒内要保持高真空。装置头部的电子

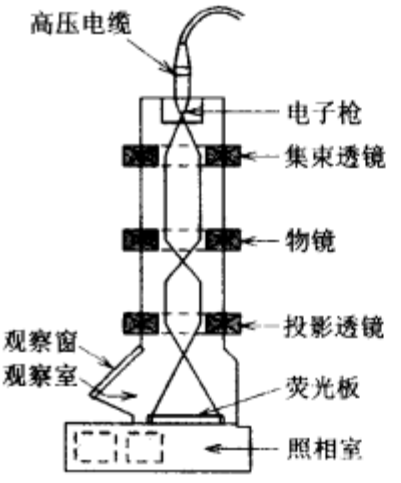


图 10.7　透射电子显微镜

枪是电子束的产生源，一般靠加热钨丝放出电子，对其施加高压（一般为 80～200kV）加速，电子束便向试件方向前进。聚焦及放大倍数调节可通过电气上改变物镜的磁场强度来进行。电子束不能直接用肉眼看到，所以最终要将电子打到涂有荧光涂料的荧光板上，间接地来观察图像。

扫描电子显微镜

扫描电子显微镜（SEM：Scaning Electron Microscope）是通过聚焦透镜及物镜对电子枪射出的电子束进行集束的。扫描电子显微镜的分辨率在很大程度上取决于电子束能够收缩到的程度，即是说取决于照射到试件表面上的电子束细到什么程度。

利用扫描线圈的作用将这种聚细了的电子束像电视图像的扫描线一样对试件表面进行扫描（见图 10.8），这时，便可从试件表面所产生的种种信息（二次电子、X 线等）中检出二次电子，然后将其转变为电气信号，再经过放大后送入与扫描试件表面的电子束同步的阴极射线管，在此阴极射线管上即可显示出二次电子图像。图 10.9 所示为电子显微镜外观。

扫描电子显微镜的聚焦就是将电子束聚集得很细，这种显微镜的放大倍数取决于试件扫描面积与阴极射线管面积之比。可见，扫描面积小时放大倍数高。其放大倍数最大也就 80 万倍，不像透射电子显微镜那么大，但是其特点是对于具有复杂表面的试件也能进行立体的图像观察。

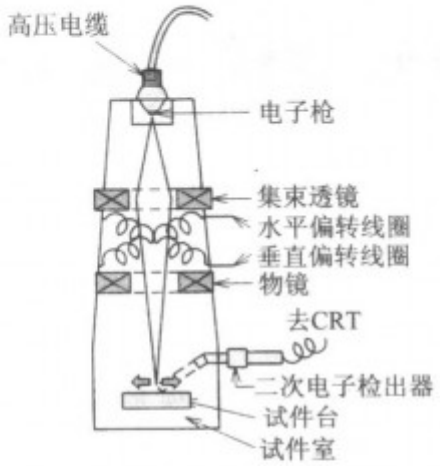


图 10.8 扫描电子显微镜

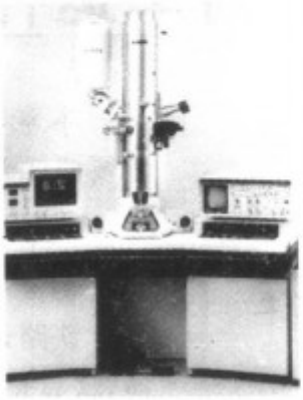


图 10.9 电子显微镜(日立 H-7100)

4　列车运行控制和安全信号设备

要　点

本章就保障列车安全运行的基本问题及其安全设备等重要事项进行介绍。

解　释

闭　塞

铁路运行时，最基本、最重要的安全事项是列车不要相撞，这是最高原则。那么，列车相撞是怎么一回事呢？这是同一时刻、同一位置有两列列车存在的缘故。因此，为了避免列车相撞，应该在线路上划分一定的区间，且每一区间内平常只能有一列列车存在。这种方法称为线路**闭塞**。

闭塞

运行控制

以闭塞方法为基础，用于保障列车安全、正确运行的安全设备可分为以下几种：

① 保持运行列车间间隔为一定距离的闭塞装置及其信号装置。

② 确保列车进入站内运行时线路畅通的连动装置。

③ 检测列车车辆异常和线路异常以保护列车安全运行的各种报警装置。

这些装置相互紧密结合在一起，即可进行最基本的安全运行控制。列车运行的主要控制装置如表 10.1 所示。

表 10.1　主要的列车运行控制装置

运行控制	控制内容	基本设备		现代化设备
线路控制	线路设定控制	连动装置		ARC、CTC
间隔控制	列车间距及运行时间间隔控制	闭塞装置	ATS	ATO
操作控制	停车、减速、加速等控制		ATC	
运行监测控制	障碍物检测控制	各种报警装置		

ARC(自动线路控制装置)

ARC(自动线路控制装置)　列车进入控制区间时，对线路上的信号机及转辙器自动进行控制的装置。

CTC(列车集中

CTC(列车集中控制装置)　将线路上运行的各列车的

控制装置）

运行信息集中显示于总控制中心的显示板上，准确地向各列车发布行进线路及各种综合指令的装置。

ATS（自动停车装置）

ATS（自动停车装置）　能在司机忘记认可或看错了信号机所发出的停车信号时发出警报，以及在司机未按规定进行操作时自动紧急刹闸停车的装置。

ATC（列车自动控制装置）

ATC（列车自动控制装置）　按照与前方列车的间隔及线路条件，自动降低列车运行速度的装置。

ATO（列车自动运行装置）

ATO（列车自动运行装置）　除了以 ATC 为基础进行减速控制外，还能对加速控制等列车操作和列车间时间间隔调整等进行自动管理的控制装置。

安全信号设备

铁路上安全信号设备多种多样。有直接与铁轨连接的转辙装置，电气法检测铁轨的绝缘和列车位置并通过各种继电开关进行信号显示的自动信号装置，ATC，以及利用计算机构成的 CTC 装置等。

这些安全信号设备的基础就是铁路线，由它把前面所讲过的闭塞区间连接起来，构成信号电流能在铁轨上流动的电气回路，从而实现能对列车和车辆进行经常性检测的最确实可靠的方法和技术（见图10.10）。这是铁路所有信号设备的根本。

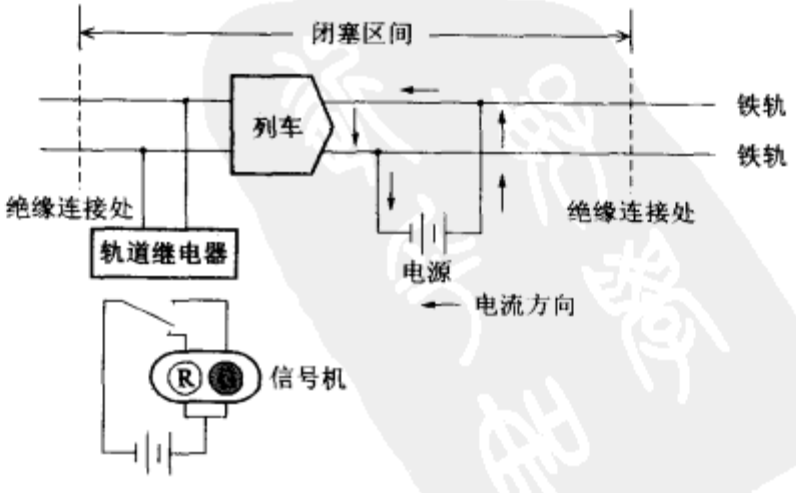


图 10.10　铁路信号电气回路

5　自动剪票和订座系统

要　点

本章介绍铁路自动剪票机的构成及订座系统的基本思想和系统构成。

解　释

自动剪票机

自从 JR 东日本车站 1990 年 4 月引入自动剪票机以来，几乎所有的 JR 车站都已经使用了自动剪票机。现在的主流机器是能使用非接触式 IC 车票的 Suica 自动剪票机。

自动剪票系统的构成

自动剪票系统是通过自动剪票机、监视器、数据统计器及自动核算机的在线连接，对旅客通行情况进行快速检查的。其中，自动剪票机的构成如图 10.11 所示，可以分为车票传送机构、旅客感知机构、门开闭机构、显示器、投票口、取票口、废票收集箱等。

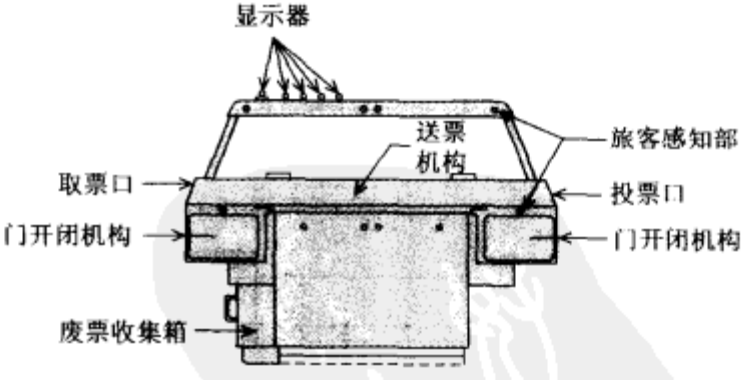


图 10.11　自动剪票机

车票传送机构（见图 10.12）是对投入的车票进行判断并正确地将其送至取票口所必经的重要部分。这里进一步大致可将其分为车票整理部和信息读、写处理部。JR 线上所使用的车票形形色色，有 SF 磁卡、近距离车票（称为埃多蒙逊票，普通车票大小）、中长距离车票（大型票）、定期车票等，其形状、材质、厚度、硬度各异。车票整理部就是将各种随机投入的车票理顺以便信息处理部易于处理的机构。

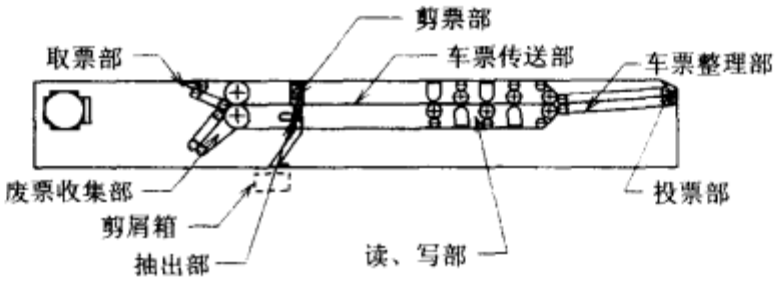


图 10.12 车票传送机构

信息处理部由类似磁带录音机上安装的那种磁头构成。在车票行走方向的，上下方安装有读出、写入、确认三个磁头，构成一个单元。这个单元每天必须对成千上万枚各种车票进行正确、迅速地判断，因而它是自动剪票机的心脏，制造要精良、耐用。

下面是一些先进的自动剪票系统。

自动计费卡

自动计费卡

所谓**自动计费卡**(stored fare card)，就是旅客只要把卡插进自动剪票机，或者只要把卡在验票屏上靠一下，便能顺利进站的一种卡。这种卡中预先存有(stored)车票款(fare)，因而也常称为 SF 卡。

非接触式 IC 卡

非接触 IC 卡

这种 IC 卡上并没有设置接触点，它是通过磁耦合或电场耦合与剪票机交换信息的，因而称为**非接触 IC 卡**。图 10.13 是利用电磁感应方式读取卡信息的机构示意，从图中

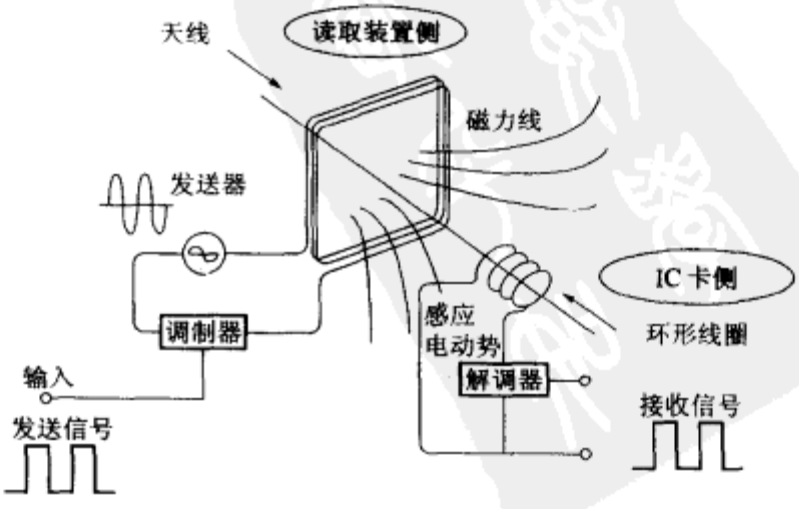


图 10.13 IC 卡的读取机构

可以看出，它的基本原理就是利用读取装置的天线与卡内的环形线圈之间的电磁感应来获得信息的。

Suica 卡与自动剪票机

Suica

Suica 卡是在上述 SF 卡上安装了一个 IC 芯片而构成的非接触式 IC 车票，这种 IC 车票可以在 JR 东日本线上的售票剪票系统上使用。这个系统是 2001 年 11 月以首都圈为中心建成的。Suica 这个名字的日文读音与“西瓜”发音相同，实际上它是“super urban intelligent card”（特级都市智能卡）的缩写，这个读音在日文中又与“轻松自在，一帆风顺”的意思相吻合，是个很吉祥的名字。

Suica 卡本身的内部构造如图 10.14 所示。

自动剪票机内部的读出机/写入机之间的通信是采用 13.56MHz 频段和 212Kbit/s 速度进行的。读/写与 IC 卡之间的处理速度非常快，包括密码处理在内，只需 0.1s 就结束了，其通信过程如图 10.15 所示。

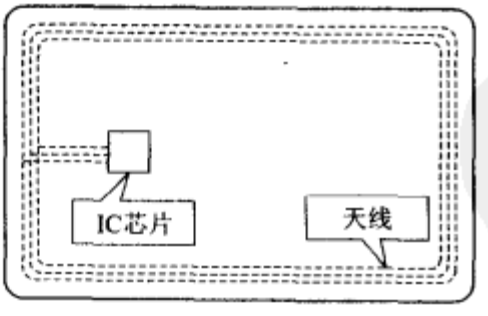


图 10.14　Suica 卡的构造

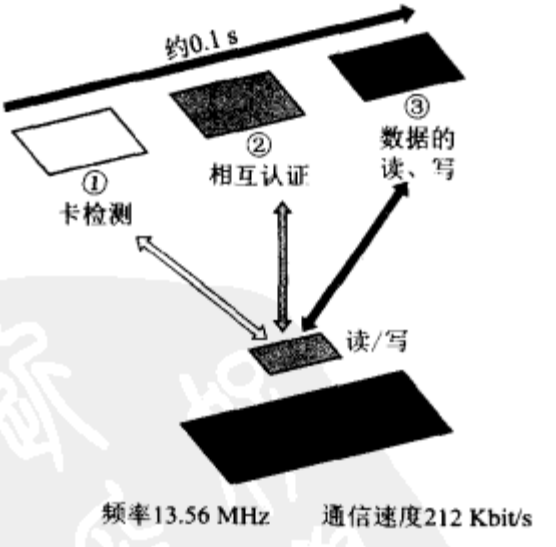


图 10.15　自动剪票机内部的通信

Suica 系统的总体构成

Suica 系统的总体结构如图 10.16 所示，各个车站设有 Suica 服务器，以服务器为中心设有自动剪票机、Suica 卡发行机、收款机窗口结算机、简易剪票机，并通过网络与 Suica 中心服务器相连接。

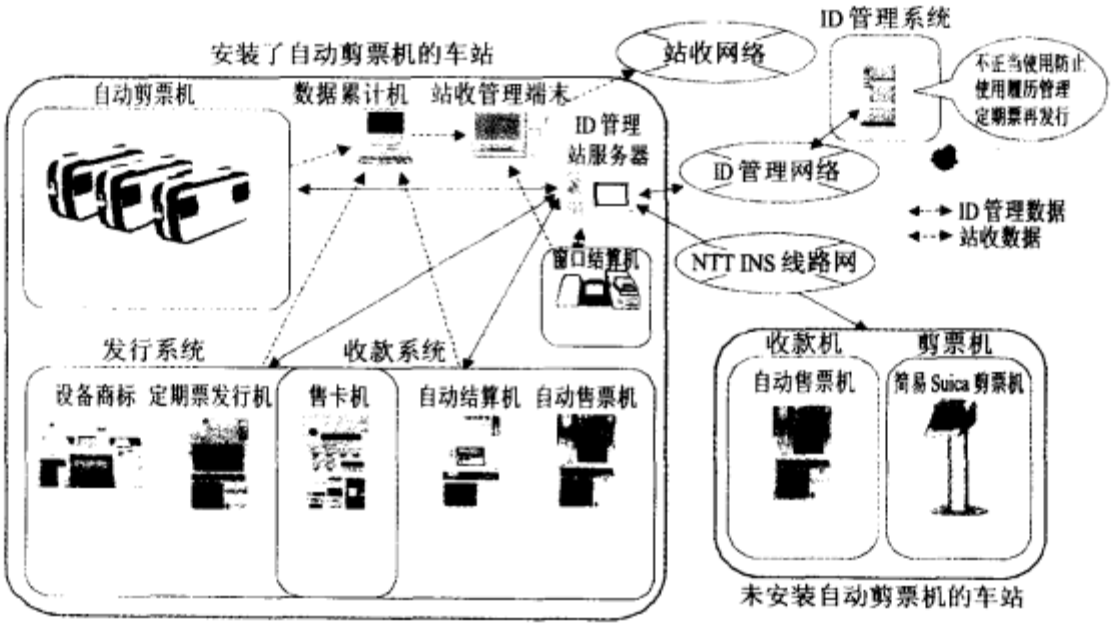


图 10.16 Suica 系统的总体构成

订座系统(绿色窗口和 MARS 系统)

以"绿色窗口"而闻名的 JR 车站的座席预订,不仅可以预订 JR 线的各种车票,而且还包括与其他系统联营的诸如飞机票、旅馆住宿票等各种票证,以及很多旅行商品。这些票证不仅可去车站的"绿色窗口"购买,也可以呆在家里用电话订购。这些与市民日常生活的综合服务项目,是由 MARS 系统提供的。MARS 系统由铁道信息系统公司进行管理。

设置在绿色窗口的终端有 M 型和 L 型。M 型是能通过向旁边写有上车站名和下车站名的孔里插针来购票的终端,而 L 型是以个人计算机为基础的小型化终端。现在,JR 线上的配备是:M 型终端 1200 台,L 型终端 1600 台,另外还有 1400 台配置在旅行社等处。

系统构成和处理能力

MARS 主体系统如图 10.17 所示,它由通信控制子系统、在库管理子系统和数据管理子系统三个子系统构成,它同时还和航空公司、旅行社、信贷公司等的系统相连接。MARS 处理的 JR 列车的车票每天有 64 万张,估计到将来旅客的增加,最大具有处理 100 万张的能力。而且对于来自

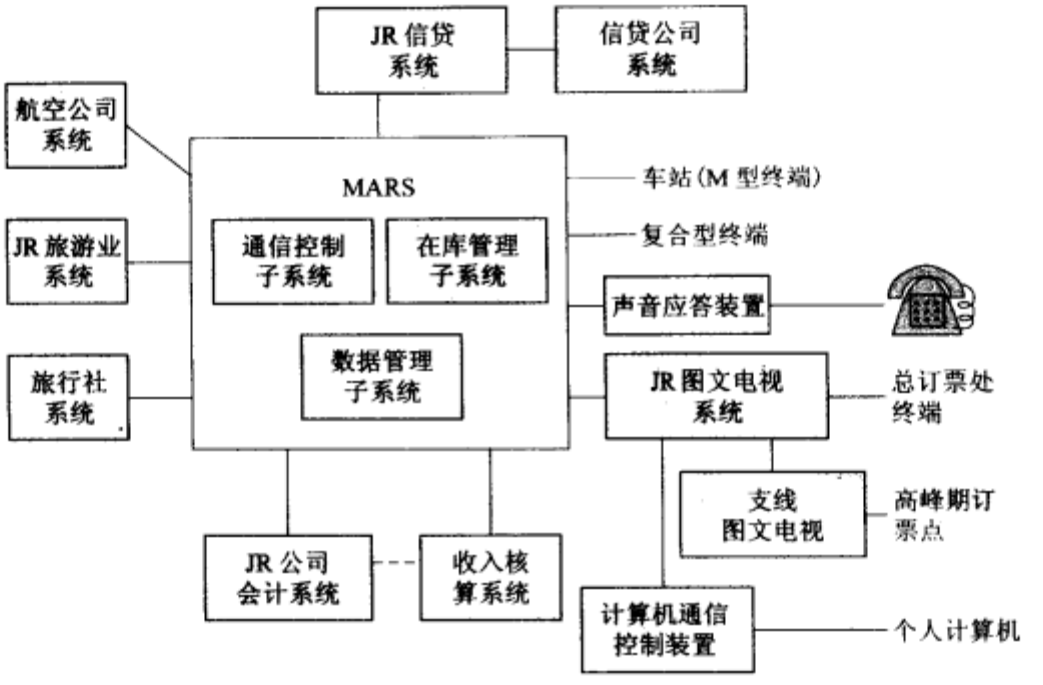


图 10.17　MARS 系统及其关系网

全国各地的订票电话可以立刻处理，具有每秒钟同时处理 130 件的能力。JR 的 MARS 系统，可以说是世界上规模最大的在线系统。

6 GPS定位

要点

要想知道航海中船舶的现在位置，或者要显示汽车现在的行车位置，可通过GPS来实现。GPS的意思是全球卫星定位系统。

解释

GPS

GPS

GPS(Grobal Positioning System，全球定位系统)是一种获知地球上的位置的方法。利用GPS测定位置的原理是先测量人造卫星上发出的无线电波到达待测位置的时间延迟，然后据此求出待测位置与卫星的距离，再进一步计算出自己现在所处的待测位置。

通信卫星

由于有了卫星通信，人们可以随时得知世界各地的新闻以及根据天空云图作出的天气预报等信息。处于地球赤道上空，且其公转周期与地球自转周期相等的人造卫星，从地球上看就是静止的。这样的人造卫星称为静止卫星。静止卫星距离地球约36 000km，为经常保持与地球上的通信，卫星始终保持良好的状态。卫星通信所使用的无线电波，其频率在2～31GHz之间。卫星频道是按国别和业务类别分配的(见图10.18)。

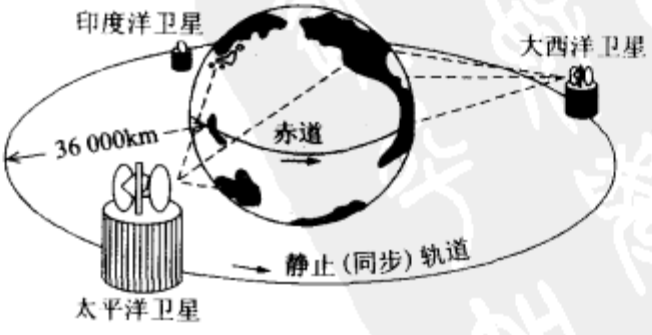


图10.18 通信卫星

GPS定位系统

GPS定位同时需要来自3颗人造卫星的信号。现在假

设人造卫星 A 到自己的距离为 a，那自己的位置就位于以 A 为中心且半径为 a 的球面上某处。如果这时又知道自己离卫星 B 的距离为 b，那自己的位置就位于半径为 a 的球和半径为 b 的球相交的圆周上某处。于是，如果知道剩下的一个卫星 C 到自己的距离为 c，则半径为 a、b、c 的三球交点即为自己的位置，自己现在位于何处即可确定。

这里，3 个球的交点有两个，其中一个交点在地球外，因而不会造成错误的位置判断。这就是 GPS 定位系统的原理（见图 10.19）。

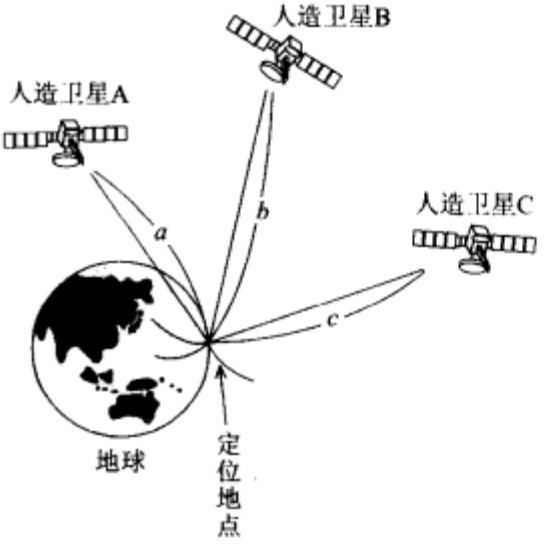


图 10.19　GPS 定位

NNSS

以航测系统为其初衷的 GPS，是以美国海军航测卫星系统 **NNSS**（Navy Navigation Statellite System）为开端发展起来的。1964 年左右开始用于核潜艇的航测，1967 年以后进入民用。

GPS 的最大优点是任何运动体都可以使用，包括船舶、汽车、飞机、直升飞机、导弹，直至个人用的移动体。

NAVSTAR

NAVSTAR（Navigation System With Time And Ranging）是第 2 代的 GPS，它是针对 NNSS 距离测量中时间间隔的测量和精度上的欠缺而开发的系统。NAVSTAR 最终由 24 个卫星的卫星群组成，覆盖着全地球。

7 航空交通管制系统

要 点

所谓航空交通管制，是指为了航空交通的安全和秩序，对飞机的起降顺序、时间、飞行路线等给出指示，提供气象状况、地面状态等航运所必需的信息业务。

解 释

航空交通业务

保障飞机航运的航空交通业务是世界性的系统，其运营必须按国际统一标准实施。所以，日本的航空法规也基本上是依据 ICAO(国际民用航空组织)的标准制定的。航空交通业务可以分为航空交通管制业务、飞行信息业务和紧急业务三类，其中，**航空交通管制业务**可以说是主要业务。其目的是在促进、维持航空交通秩序正确井然的同时，防止飞机相撞。

航空交通管制业务

世界的空域，几乎全部都被指定为飞行信息区(FIR：Flight Information Region)。而且各 FIR 的名称并不是国名，而是负责该空域的管制中心的名称。日本负责的空域有东京 FIR 和那霸 FIR(见图 10.20)。东京 FIR 分为札幌管制部、东京管制部和福冈管制部三部分。

在 FIR 内的空域，还有管制空域和非管制空域之分，当然管制的规则也不相同。

管制空域

管制空域 它是实施航空交通管制业务的空域，由管制区、管制圈、海上管制区组成。

管制区

管制区 它是地上或离水面 200m 以上的空域，航线自不必说，也是飞机起、降所必须管制的空域。

管制圈

管制圈 它就是机场区，其范围为离机场标点半径为 9km、高度为 900m 的空域(民用机场)。

海上管制区

海上管制区 原则上为离海面 1 700m 以上的空域。东京和那霸两个管制区的国际对空通信局所负责的是国际航线飞机的通信业务。

管制空域内，想要以仪表方式(听从管制机关指令的飞行方式，定期航班采用此种方式)飞行的飞机，需要得到管制

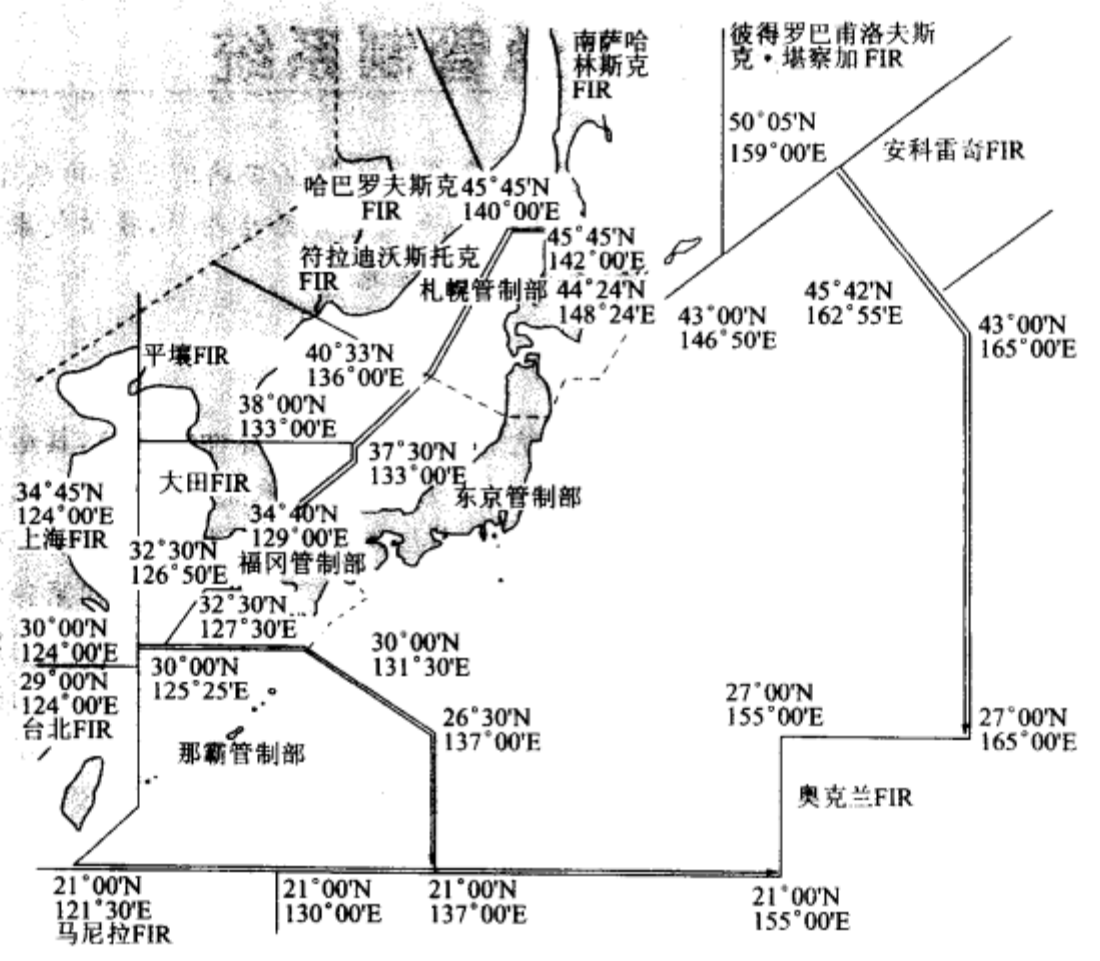


图 10.20　日本负责的空域

中心的承认，飞行中要求随时收听管制机关的频率信号并服从其指令。管制用语在无线电话中原则上规定使用英语。英语水平达到专门用语中心英语考试 2 级或同等程度即可。

航空交通管制业务

航空交通管制业务，按照其负责的范围，可分类如下：

航线管制

航线管制　在日本设有东京、札幌、福冈及那霸管制中心。

航线管制负责的准降管制

航线管制负责的准降管制　地区性小机场使用。

航空枢纽管制

航空枢纽管制　交通繁忙的主要机场使用雷达引导飞机起、降。管制塔下设有雷达室。

准降管制

准降管制　没有雷达的机场，按照标准出、入方式飞行。

机场管制

机场管制　有关跑道以外的地面行走的管制：起、降管

飞机的管制；来自制中心的管制承认的中继。

在日本群岛 17 个地方设置有航线监视雷达，几乎覆盖了全部国土。国内的主要机场也有机场监视雷达，管制人员将其编组，一边看着雷达屏幕，一边进行航线、起飞跑道、降落跑道等的管制。航空管制业务的种类及其负责的空域示于图 10.21 中。

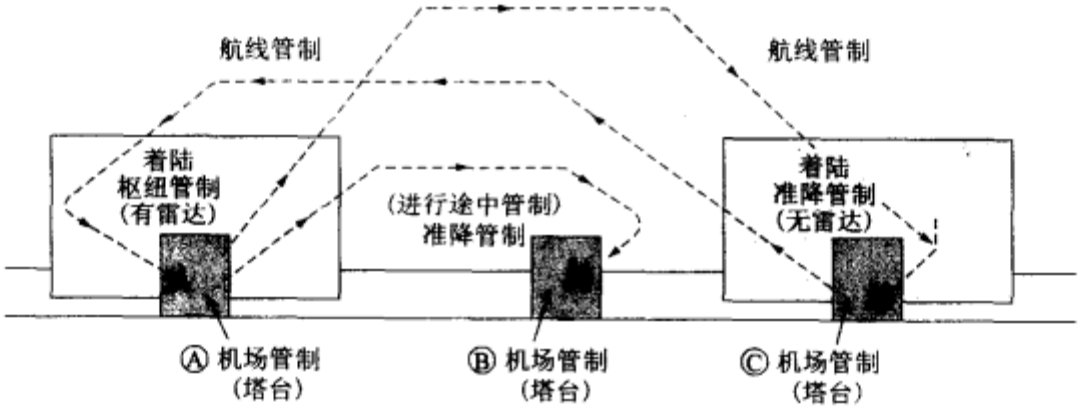


图 10.21 航空管制业务种类

IFR

飞机以 **IFR** 方式（仪表飞行方式：Instrument Flight rules）飞行时，从出发到飞机到达目的地后发动机停止运转为止，飞机一直处于管制人员的监视之中。塔台管制人员负责到飞机起飞。起飞后，到达机和出发机在空中混合飞行时，由出发管制（departure control）的管制人员负责。到达巡航高度前和在航线上飞行期间，由航线管制中心的管制人员负责。而接近目的地时，和这种起飞飞行的接力管制相反，是由管制中心的准降管制（approach control），再转向塔台（tower）管制。

8　身体的检测

要　点

最近的医学在其进步的同时与电子技术的结合越来越深。利用电子技术制成的医疗机器称为医用电子仪器或简称为 ME(Medical Electronics)机器。本章介绍血压计及心电图的测量使用。

解　释

血　压

人是从心脏向全身输送血液以维持生命的。为此，心脏要反复地收缩和扩张，这时从心脏送出血液的压力即为“血压”。人的血压值有一个正常的范围，血压持续高于正常值时，大脑、心脏及肾脏等就会增加过分的负担。相反，血压过低时，血液就不能充分流遍全身，就会产生站起时头晕等症状。因此，随时注意血压是否保持在正常值范围内是很重要的。

自动血压计

医院等处使用的自动血压计是由血压计自身所带的计算机来测量血压的。袖布(测量时用于加压的卷在手臂上的布)的加压用电机进行，测量的方法是听**科罗音**。所谓科罗音，就是当袖布加压时用听诊器在袖布下所听到的声音。这个声音是末梢侧动脉的脉搏声，与心脏跳动一致。而且，这个声音只有在某一特定的压力范围内才能听到。发现这一现象的是 20 世纪初俄罗斯的科罗托科夫，所以就用他的名字来命名。科罗音刚开始出现时的袖布压相当于人的最高血压，消失时相当于人的最低血压。图 10.22 所示的照片称为**电子血压计**，它是用话筒收听科罗音进行血压值的判定。用按压开关的办法给袖布加压，自动测量高压和低压，并将这两个数值用数字显示方式表示出来。另外，还有能够在手腕和手指上测量血压的自动血压计。

科罗音

电子血压计

心电图

构成人的心脏的每一个心肌细胞都会因其兴奋状态而

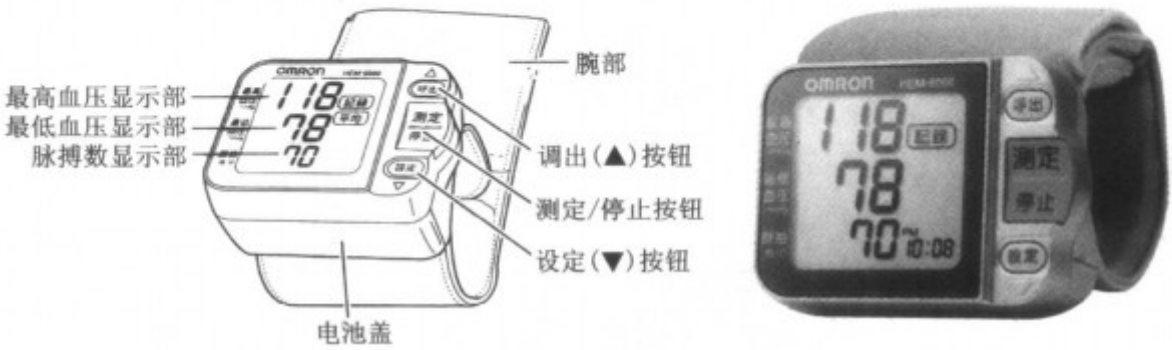


图 10.22 电子血压计(欧姆龙公司 HEM-6000)

心电图

产生活动电流,将其作为电压变化通过贴于体表的电极引出,所测得的变化波形称为**心电图**。如图 10.23 所示,心电图的各种波上所标出的名称 P、Q、R、S、T 都是全世界通用的名词。

P 波来源于心房的收缩,Q、R、S、T 波则来自心室的收缩,因此可以从波形的形状和大小,相位的变化,各波有无出现,以及各波的相互关系获得推测心脏活动状态的线索。

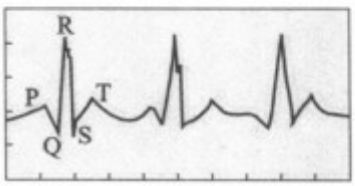


图 10.23 心电图

心脏反复收缩和舒张变为电信号的变化,从这个意义上也可以说,人体中心脏就是一个小型发电站。电压值可以达到 1mV 到数 mV 的程度。同一被检者用同一记录法得到的心电图波形几乎总是相同的,因此,健康时的记录即是该人很好的档案资料。

荷兰的阿因托霍菲(1860—1927 年)是首次对人的心电图作了记录的人,他确定了将电极放在两手和两足处引出心电图的方法,为现在的心电图奠定了基础。

心电仪

通过心电图诊断心脏病的装置称为心电仪。装在患者身体各处的电极通过引出线接到心电仪上。图 10.24 给出了心电仪的构成。可用选择器挑选出想要记录的两点间的电位差并将其放大。心脏跳动引起的电压变化在数毫伏至

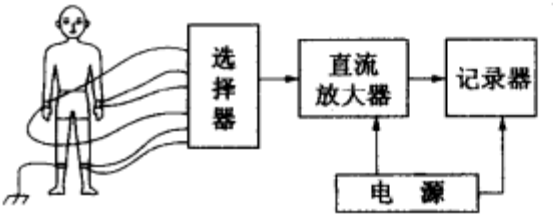


图 10.24　心电仪的构成

数百毫伏之间，且频率很低(0.1～200Hz)，因此要用直流放大器。心电图的波形可以用 CRT(阴极射线管)或 LCD(液晶显示器)等显示。为了人体安全，仪器要良好接地。

9 X光透视和CT诊断

要 点

ME机器有诊断仪器和治疗仪器两大类。本节接着第10章第8节，介绍诊断用的X光机、CT扫描仪、核磁共振(MRI)仪及超声波诊断仪等。

解 释

X光机

1895年德国人伦琴发现了伦琴射线(X射线)，这种射线穿透物质的能力很强。利用此原理制造的医用装置称为X光机。X射线在电场或磁场中完全不弯曲，反射镜和棱镜等也几乎不能使其反射或折射。当初发现时因为不明其性质而起名为X射线。X射线的显著特征是波长很短，因而具有不透明物质亦可穿过、人眼不可见但可使照相干版或荧光物质良好感光等性质。

X射线管的原理

产生X射线的电子管称为X射线管，图10.25是它的原理。电子管的真空中高速运动的电子碰撞到阳极(对阴极)上，就会在此阳极上产生X射线。为了加速电子，要在管子的两端加上数十至数百千伏的高压。其产生高电压的装置大多都采用变压器。图10.25是X射线发生装置的原理，图10.26是装置上所用的X射线管，图10.27则是X射线装置。

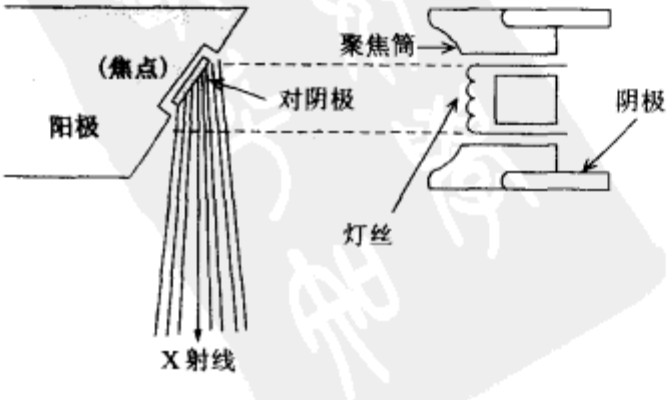


图10.25 X射线发生装置的原理

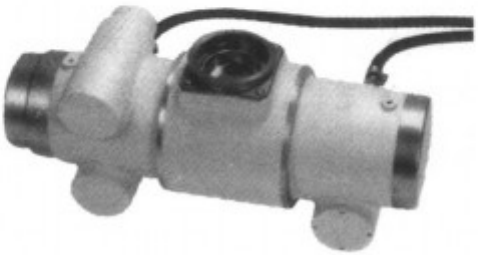


图 10.26　X 射线管装置
（日立 UK-4RC-212T）

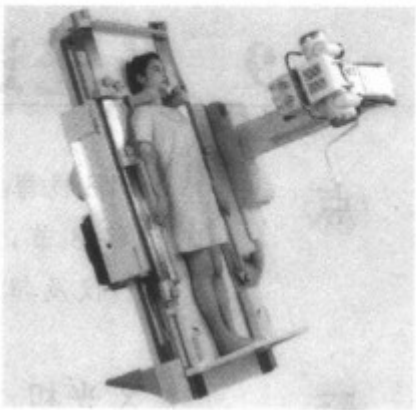


图 10.27　X 射线透视装置
（日立 TU-110XF）

X 射线断层成像装置(X 射线 CT)

X 射线 CT(xray computed tomography)是利用 X 射线的透射，得到头及身体各部位的环切断面像，从而对患病部位进行检查的装置(见图 10.28)。CT 的原理是用 X 射线从多个方向对人体进行照射，敏锐地检出透过人体的 X 射线，将透过的 X 射线量的信息交由计算机处理后得到重构的断面二维图像，并将这样的人体断面显示于电视监视器的屏幕上。



图 10.28　CT 扫描系统(日立 CT-W3000)

核磁共振断层成像装置(MRI)

MRI(Magnetic Resonance Imaging)的原理是，将人体置于强磁场中，进行特定的高频照射，这时，由于与高频的共振，人体中的氢原子就会放出电波能，将此电波能的分布状况图像化即可对体内组织进行诊断。与 X 射线装置相比，

MRI具有分辨力高且状态易捕捉等特点。

最近，利用超导磁铁所产生的极强的磁场，不但能捕捉到氢原子的状态，还能捕捉到磷、钠等原子的状态，这样一来，就连肌肉的一点点异常都可以检测出来了。

超声波诊断装置

声音的振动频率达到20kHz以上时，人们的耳朵就听不见了。频率这样高的声波称为超声波。

超声波的频率越高，其方向性越强，传播特性与光越接近，其反射、折射等现象可以按照光学中的处理方式进行处理。

超声波在人体等生物体的软组织（水分多）中的传播与在水中的传播方式一样，因而作为超声波诊断装置广泛应用于医疗领域。超声脉冲进入体内途中，碰到生物组织中对声音的作用不均匀的地方（界面）时，就会有反射波返回，将其成像显示于CRT上即可用于诊断。

X射线CT的研究展望与防护

X射线CT与MRI各有优、缺点，它们都在医疗诊断装置中占有重要位置，其重要性今后还会增加。与MRI相比，X射线CT有扫描（照射）时间短、经济等优点，但是也有放射元素危害的不利。为此，为了在X射线放射危害很小的前提下得到分辨力很好的图像，人们期待着灵敏度更高的检测器的研究与开发。

关于X射线的防护，从1895年X射线发现以来，经过其后的实验时代，人们已经知道铅等金属具有X射线不易穿过的性质。据此，遮蔽能力优良的铅及其化合物常被用作X射线防护的原材料。实用上，常常是将又薄又柔软的含铅尼龙布制成X射线防护衣，或者多层缝制做成隔断用窗帘来使用。

现在，虽说X射线装置已经得到高度发展，无需担心装置本身会有不安全的X射线泄漏，但是只要用它进行诊断，就必须尽可能做到完全不受其散射的危害。为此，不仅要使用防护用品，还必须遵守X射线防护三原则：

① 保持距离。

② 短时使用。

③ 遮蔽正确。

这样考虑的基本根据是，X 线辐射的能量和时间成正比，而和距离的平方成反比。

10　速度的测量

要　点

速度的具体表现形式很多，如汽车的行驶速度、棒球手投出的棒球速度、发动机和电动机的旋转速度、水流速度等。本节按照速度形式的类别介绍几种测量方法。

解　释

移动体速度的测量与速度枪

高速公路上正在行驶着的汽车和棒球场上投手所投出的棒球是移动体，这类移动体的速度常采用速度枪来测量。速度枪是一种利用电波传播中的多普勒效应来测量移动体速度的方法或工具。

多普勒效应

多普勒效应可以用声音的发生源与声音观测者之间相对运动的关系来说明。假定有一列拉响汽笛高速行驶着的火车，位于火车前方的观测者所听到的汽笛声比较尖，而位于火车后方的观测者所听到的汽笛声则比较钝。这一结果便是多普勒效应所造成的(见图 10.29)。换句话说，在观测者与声源之间的位置关系分别为相对静止、相互接近运动、相互远离运动的不同情况下，实际测得的声源频率是各不相同的。相对静止情况下测得的频率是声源的真正频率，相互接近运动情况下测得的频率比声源的真正频率高，相互远离运动情况下测得的频率比声源的真正频率低。不言而喻，如果观测者与声源之间的相对运动速度大，则实际测得的频率与声源真正频率之间的差别也必然大。这种现象就是多普勒效应。多普勒效应不仅存在于声波之中，电波的情况下也

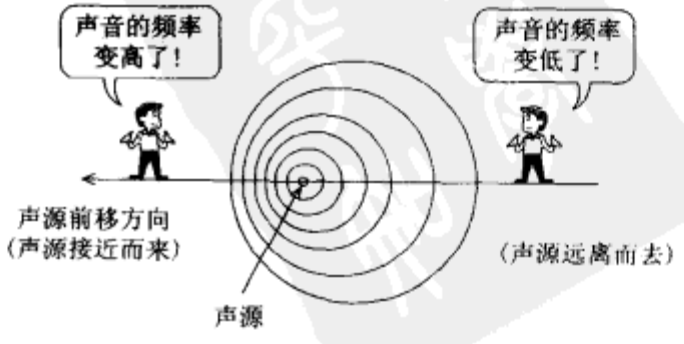


图 10.29　多普勒效应

同样存在着多普勒效应。

图 10.30 是一个速度枪的工作原理。速度枪由喇叭天线、微波发射器、接收器、放大器及速度显示器构成，发射频率采用了 10.525GHz(1GHz＝10 亿 Hz)的微波。当速度枪把电波射向行驶着的汽车时，由于汽车与速度枪是相对运动的，因而从汽车上反射回来的电波的频率与发射频率不同，二者之差称为多普勒频率。速度枪便是根据这个多普勒频率计算出汽车行驶速度的。

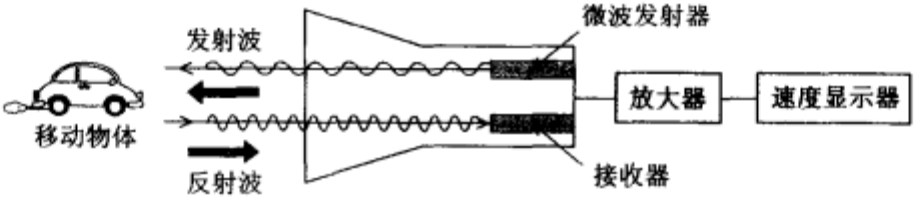


图 10.30　速度枪的原理

旋转速度的测量

发动机和电动机是旋转体，旋转速度常采用由永久磁铁和检测线圈所组成的电磁式检测器来测量。如图 10.31 所示，在旋转轴上安装一个检测齿轮，将检测线圈置于该齿轮附近，这样，当旋转轴旋转时，检测齿轮的齿尖便一个接一个地接近永久磁铁，检测线圈中便会感应出一串脉动电动势。这个脉冲串再经过换算处理，便可在数字显示器上显示出旋转轴的每分钟转数。

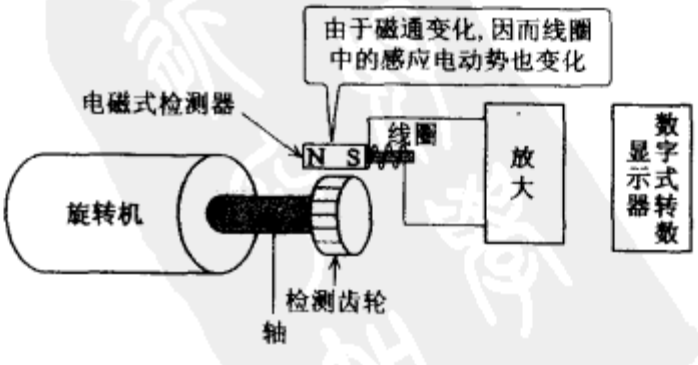


图 10.31　电磁式转速表的工作原理

图 10.32 是光电式转速表的工作原理示意。在旋转轴上贴一小片反射镜，当发光二极管所发出的脉冲光波(10kHz)

照射到这个反射镜上时，旋转轴每转动一圈，光电三极管便会收到一次反射光脉冲串。这个光脉冲串经过光电变换、波形放大整形、检测积算，最后以每分钟转数显示在旋转速度显示器上。

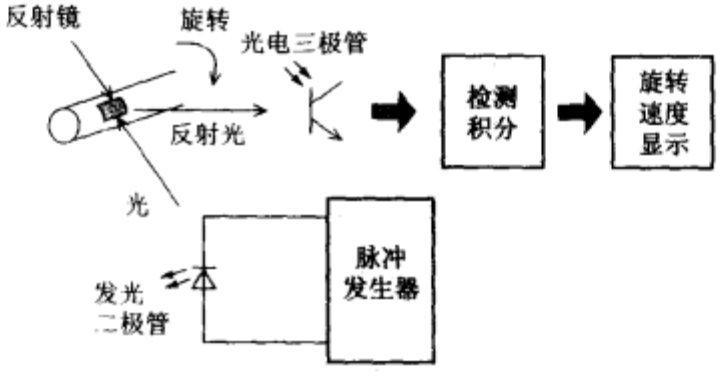


图 10.32　光电式转速表

流体速度的测量

水流的速度也可以用电磁式检测器来测量。如图10.33所示，在非磁性体的管子里安装一个带有磁铁的叶轮，管子外面放一个检测线圈。当水流推动叶轮转动时，磁铁跟着一起转动，检测线圈中便会因磁铁转过而产生感应脉冲电压，将这个脉冲电压加以放大、整形和计算，便可得到由数字显示的水流速度。

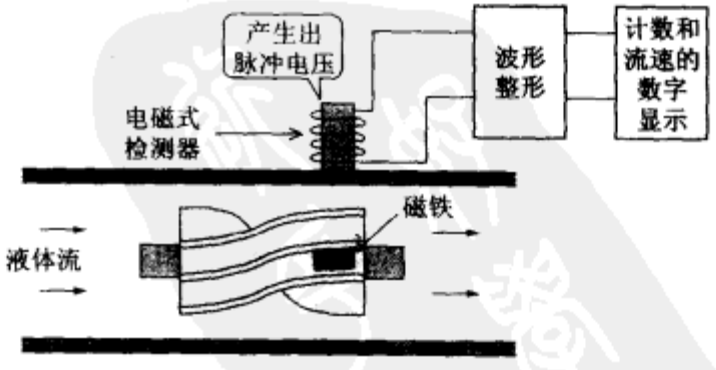


图 10.33　流体的速度测量

11　警戒装置

要　点

居室安全是日常生活中的重要问题，除了消防安全之外，利用警戒装置防止不受欢迎者入侵也是一个重要方面。摄像监视设备、热辐射传感器监视设备、超声波传感器监视设备及电密码锁等都常作为警戒装置来使用。

解　释

摄像监视设备

摄像机能够将来客的图像拍摄下来显示到监视器上，建筑物周围、电梯里、房门口等环境中经常采用摄像监视系统作为警戒设备。

摄像警戒设备的外形如图 10.34 和图 10.35 所示。



图 10.34　电梯内的警戒摄像机



图 10.35　停车场的警戒摄像机

热辐射传感器监视设备

热辐射传感器监视设备是利用远红外线的作用所制作的空间警戒装置，它是通过对墙壁和地板温度与人体表面温度之差的计算来判断是否有人进入室内的。一般红外线是指波长比可见光长、比极超短波短、在 750mm～1mm 之间的电磁波，其中，波长在 20mm 以上者称为远红外线。远红外线在空气中不易散射，比可见光的穿透力强。

热辐射传感器警戒设备的工作原理如图 10.36 所示。在房间里安装一个热敏元件，并以热敏元件为中心，利用透镜或反射镜将警戒场所分为几个区域，分别对各区域的温度

进行监视。当有人进入某一区域时，由于墙面和地板的温度与人体表面的温度不同，因而其红外线的辐射强度也不同，于是警戒设备便知道有人进入这一区域了。一般情况下，当人体表面温度与墙壁地板温度相差 3℃ 左右时，警戒设备就能识别出来。

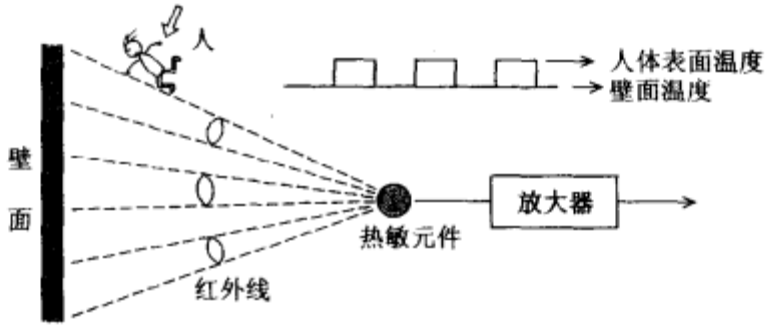


图 10.36 热辐射传感器警戒设备

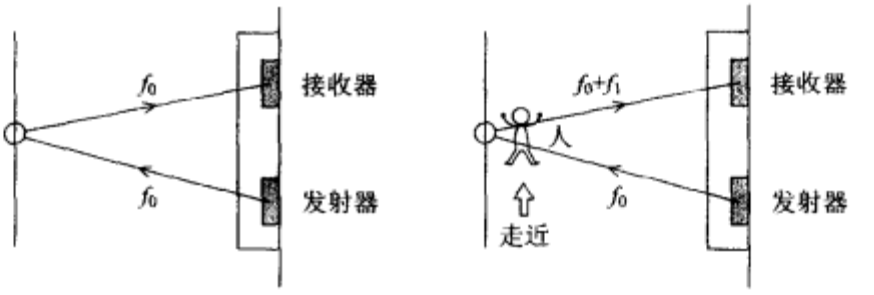
这种警戒设备主要广泛用于室内警戒。室外的情况下，特别是夏天里，人体表面温度与周围环境温度差别很小，这时警戒设备可能就发不出报警信号。

超声波传感器监视设备

超声波的频率在 20kHz 以上，人的耳朵是听不见的，但能用压电振子（即传感器）检测到。超声波的产生也采用压电振子。

利用超声波对室内空间进行警戒的方式有两种。一种是移动检测方式，也就是利用多普勒效应来检测是否有人进入房间或在房间里活动。如图 10.37(a) 所示，当房间里没有人时，发射器所发射的超声波（频率为 f_0）从墙壁上反射到接收器，接收到的信号频率不会发生变化，仍然是 f_0。图 10.37(b) 是有人走进房间时的情形，这时，接收器所收到的信号频率将是 f_0+f_1。于是，根据频率是否有变化，便可判断出是否有人进到房间里来了。

另一种方式称为存在检测方式。这种方式是利用断续发射超声波和计算从物体上反射回来的时间来检测物体的所在位置的，可安装在大门口等场所，用于确定客人所在的位置。



(a) 没有移动物体的情况下
(频率不变)

(b) 有移动物体的情况下
(频率发生变化)

图 10.37　超声波式移动检测原理

图 10.38 所示是超声波传感头的示意。

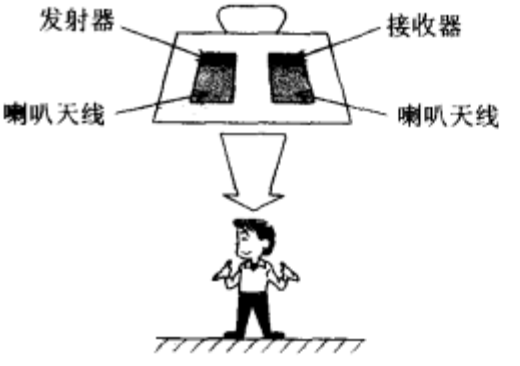


图 10.38　超声波传感头

电子密码锁系统

电子密码锁是指不用机械式钥匙而是用电的方式来开门、关门的门锁，如用磁卡或密码按键来开关的门锁，也常称为自动锁。

题外话

邮政标志〒是怎么来的？

现在，只要用手机电话或个人计算机发一个邮件(信件)，转眼间收件人就收到了。然而在这种装置尚未开发出来之前，信件只能靠邮局来传送，发出的信总要等待很长时间才能收到。在那个令人郁闷的邮政通信时代中，人人都熟知邮政的标志"〒"，那么，这个符号究竟是怎么来的呢？

1887 年(明治 20 年)，当时的"递信省"(后来称为邮政省，即现在的日本

邮政公司）决定采用一个邮政标志，由于递信的“递”字的片假名注音符号为“テイ”，这个读音又与甲、乙、丙、丁的“丁”字相同，于是就决定以“丁”字作为符号。但是，后来又发现这个符号与世界通用的邮费不足符号“T”容易混淆，于是又以片假名“テ”的形状为依据在“丁”字的上面加了一横，改为用“〒”作为邮政的标志。

12　信息家电与自在社会

要　点

未来家居变化的最大因素莫过于信息化。要构建信息家电环境(家庭网络),不仅有赖于家电生产厂家今后在技术上的进一步开发,而且有赖于与之相关的电力公司在标准通信规格方面的开发。最近,便携电话和互联网的普及速度之快简直令人瞠目,这就不禁使人联想到,媒体的终极形式必将造就自在社会的到来。

解　释

□ 信息家电——所有的设备都是网络联接

由于互联网的普及,具有 2 台以上个人计算机的美国家庭在 2001 年已经达到了 61%,计算机的普及一下子就推进了一大步。日本虽然晚了几年,但家用设备的网络化要求在明显增加,眼看着就要赶上美国的发展趋势了。可以预料,高速宽带网的入户必将给人们的生活方式带来巨大变化。

为了有效地推进节能、高龄化对策及安全防范措施的实施,就要构建将来能够进行综合管理的家庭网络,以便通过通信线路与外部的连接来接受更高级的服务(见图 10.38)。例如,按照家里有人、无人的具体情况来决定空调、换气扇、照明等设备的开与关,并根据对用电量的检测结果进行节能控制;家里无人时进行入侵监视及火灾等异常事件的判断及向安保中心发送紧急通报;家里有人时进行个人健康信息和监护支援信息等家庭健康信息的管理等。

随着电冰箱的大型化及室内空调设备的增多,单个设备的节能措施已经很难达到良好效果,从整个家庭的角度进行系统综合管理已很有必要。人离开屋子时随手关灯之类的简单措施,最多只能节省 10%左右的能源,从这个意义上来说,如果采用让电灯开关与能够感知室内是否有人的红外线传感器连动的自动控制系统,便有望达到更有效的效果。

不过,当前的现状还处于大多数家庭的家电设备都是超年限使用的状况,不到用坏不买新设备的情况相当普遍。像电视机和电冰箱这类设备,平均使用时间大都在 10 年左右。

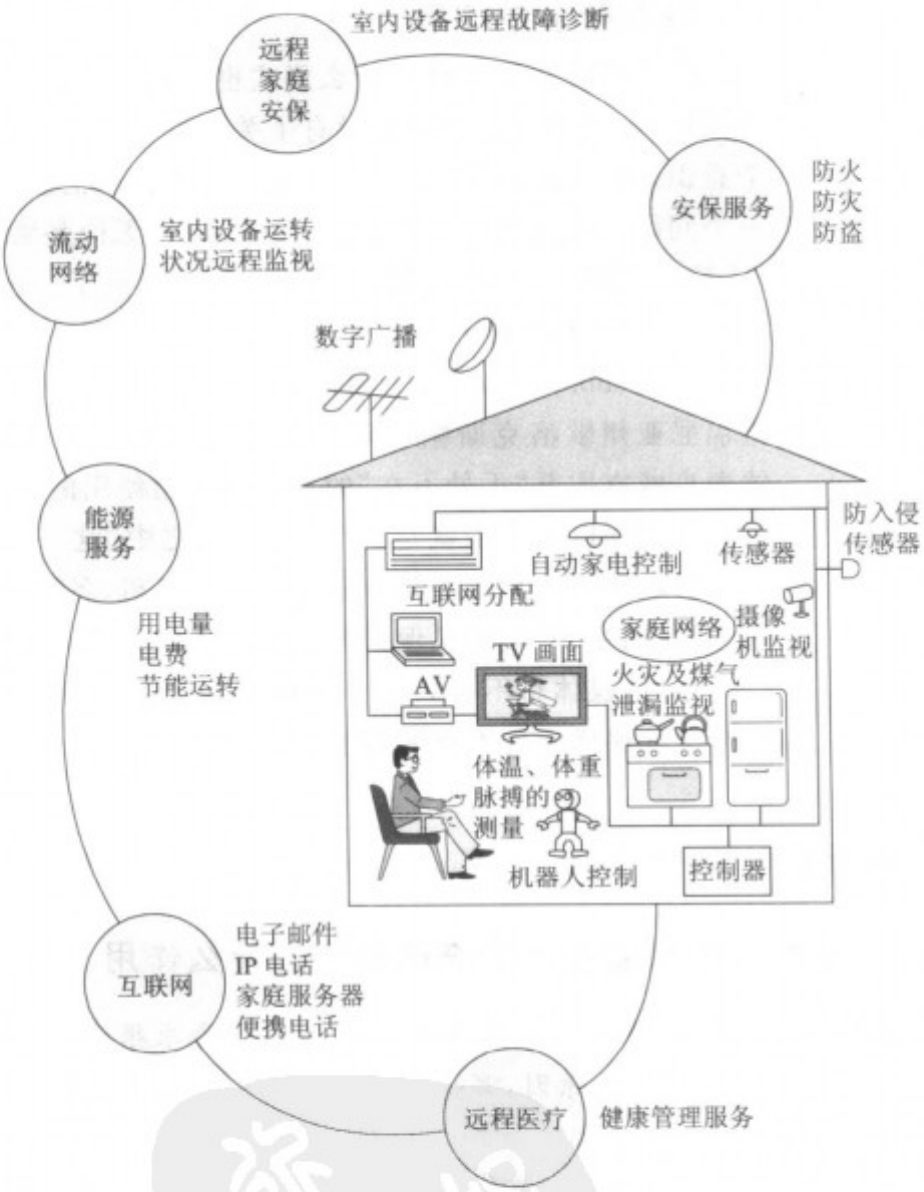


图 10.38 未来的家庭网络系统

并且，信息家电产品增加功能的部分比一般家电产品的比例还要高。从这些因素来看，纵然推出信息家电产品并努力向消费者宣传，要达到广泛普及也还得经过一段时间。因此，解决成本高的问题将是家庭网络前进路上的一个难题。

服务的可能性也许是没有限制的，但在实际推进家电信息化的时候，还必须考虑到世界资源有限的实际情况，以及人们真正需要的功能究竟是些什么。

自在社会的序幕

媒体的终极形式就是什么形式也没有。也就是说，到了终极形式，使用者已经完全没有了关于媒体的形式是什么这个意识，而只是随时随地在自在地谋划着获取信息的目的这一个问题。说得通俗一些就是，到了那时，无论是墙上、桌子上，还是衣服里面，到处都已经蕴含着计算机了。说得再简单些，就是人们已经把计算机当作是自身感觉的一部分了。

自在(ubiquitous)这个词是 20 世纪 80 年代末期美国加里福尼亚州歇洛克斯帕洛阿尔托(Xerox Palo Alto)研究所的麦克威查取其“无处不在”的意思而开始使用的，其基本想法就是必须以人本来就是“存在于运动之中”这一点为前提来发展媒体技术。自在系统是超小型计算机、各种传感器功能、无线网络、个人隐私保护等众多技术密切关联着的系统。

今后，媒体将不再只是个通信工具，它将逐渐成为一种就像空气那样无处不在的环境。

题外话

无停电电源装置中的充电电池起什么作用

通信设备、计算机、医疗仪器等装置对供电电源的要求很高，无论是电力系统出现事故还是出于其他原因，哪怕是瞬间停电或电压下降，都会造成极大的损失和不良影响。

为了防止这些影响的发生，电源装置必须具有保持功能，以保证在任何情况下都能始终如一地向负载设备供应大小稳定、波形良好、频率恒定的电压。这种电源装置称为无停电电源装置(Uninterruptible Power Supply)，通常简称为 UPS。UPS 的工作原理如图 10.39 所示，图中，负载设备所使用的交流电不是直接采用商用交流电，而是商用交流电经过了从交流到直流的变换(即变换器)并又从直流变成交流(即逆变器)两个环节后才加在负载设备上的。在商用交流电正常的情况下，连接在变换器和逆变器结合点上的电池一直在接受变换器对它充电，一旦停电，便由电池继续向逆变器提供直流电压，负载设备的供电电压大小、波形、频率等状态始终不会变化。

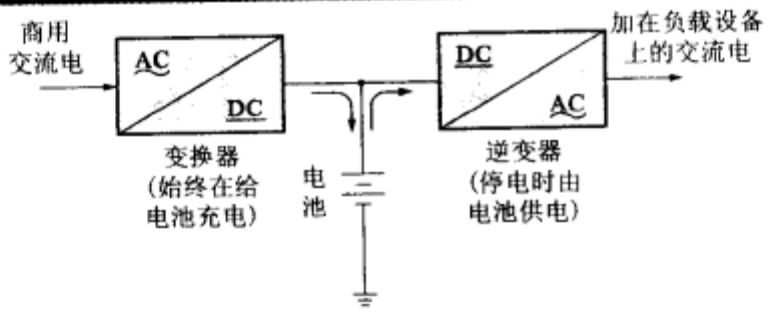


图 10.39 UPS

13　数码照相机

要　点

数码照相机(digital camera)中所用的感光元件是半导体图像传感器 CCD(Charge-Coupled-Device)或 CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)图像传感器，在这点上，数码照相机与视频摄像机是一样的。但在应用方式和记录图像的方式上，二者有所不同。

解　释

照相机与数字化

数码照相机与用胶卷记录图像的普通照相机不同。数码照相机是用 CCD 或 CMOS 图像传感器来感光，并将感光所得到的模拟信号变换成由 0 和 1 表示的数字数据存储到半导体储存器等媒体中的。所拍摄的照片没有冲胶卷和印相片那样的处理过程，所存储的数据可以直接在照相机的液晶显示屏上随时翻看，也可以输入到计算机中去进行加工处理，或者用打印机打印成纸质照片。数码照相机无论在拍照和事后处理方面都比胶卷照相机灵活方便得多，这都是数字化所带来的优点。

感光器件(摄像器件)

CCD 和 CMOS 图像传感器本身并不能分辨颜色。数码照相机的彩色照片是通过拍照时的分色处理和显示时的色合成处理得到的。在摄像器件前面安装上 R、G、B 三基色滤色片(或者 Y、M、C 补色滤色片)，拍摄时便可得到携带着彩色信息的数据，显示时再将这些数据进行相加混色(或相减混色)合成处理，便可重现出彩色图像。

摄像器件像素数目的多少是数码照相机的最基本指标，像素数越多，照出的照片越细腻清晰，即所谓分辨率越高。这个指标与胶卷粒度粗细相当。

另外，摄像器件的尺寸大小也是数码照相机的一个重要指标，在像素数相同的情况下，摄像器件的尺寸越小，照出来的照片分辨率越高。摄像器件尺寸大小通常用对角线长度

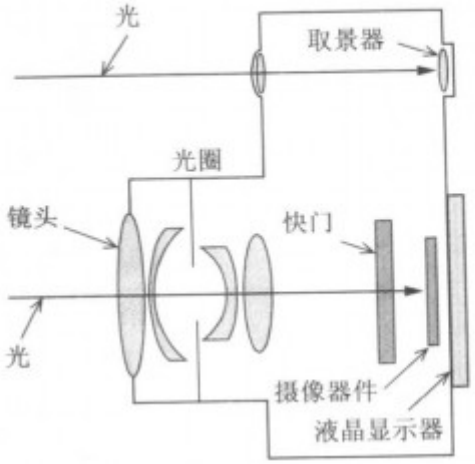
的英时数来表示，一般有 2/3in、1/2in、1/3in 等规格型号。

数码照相机的构造

数码照相机的构造有两种类型，一种是一般的袖珍型（见图 10.40），另一种是单镜头反射型（见图 10.41）。无论是哪种类型，与胶卷式照相机最大的不同就在于它们都不采用胶卷，而是采用摄像器件和存储媒体。此外，二者的机壳里面都有用于对所拍摄的图像进行处理的运算单元电路以及电路工作时所需的电源。电源一般都采用锂离子（Li-ion）电池。



(a) 外形

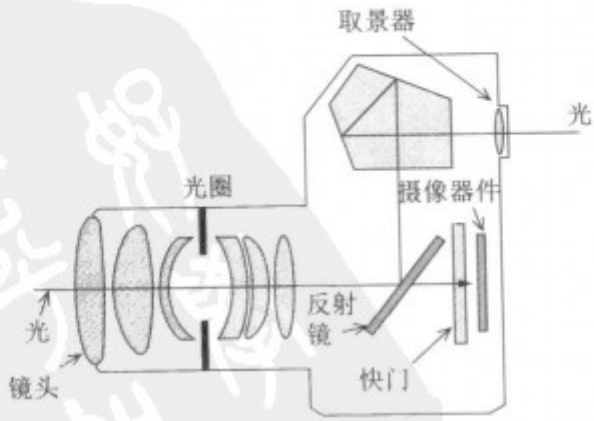


(b) 构造

图 10.40 袖珍型



(a) 外形



(b) 构造

图 10.41 单镜头反射型

袖珍型数码照相机的取景器是单独设置的。由于它与

主镜头不在一条光轴上，因而从取景器中所看到的景物，与实际照在摄像器件上的景物图像并不完全相同。正因为如此，几乎所有的袖珍型数码照相机都又在机壳的背面设置了一个液晶显示器。

单镜头反射型数码照相机取景器中所看到的景物直接来自于主镜头，它是由设置在主镜头光路上的反射镜反射到取景器中的，因而实际拍摄的景物就是取景器中所看到的景物。但是单镜头反射型数码照相机有一个应该注意的问题，这就是快门打开的一瞬间取景器中什么也看不见。造成这一问题的原因是，当快门打开时，位于主镜头光路中的那个反射镜跳离了主光路的缘故。

存储媒体

数码照相机的存储媒体种类很多，有压缩闪存卡（CF卡）、微型驱动器、SD 存储卡、灵敏媒体（smart media）、存储器棒等。其存储格式为 JPEG、RAW、TIFF 及 BMP 等图像压缩格式。

JPEG 是从开始有数码照相机时起就已在互联网上广泛普及了的标准图像格式。这种格式采用了特珠的数据压缩技术，能够把所要保存的图像用很少的数据保存下来。

RAW 是数码照相机技术中独有的图像格式，它能把摄像器件所获取的信息全部保存下来。所保存下来的信息可通过计算机图像处理而得到最接近实际景物的图像。

TIFF 是用 Windows 或 Macintosh 等操作系统进行各种设计的部门和印刷部门所广泛采用的图像格式。

BMP 是保存数据时基本上不进行压缩的图像格式，可以在 Windows 环境下使用，代码为 16bit。

题外话

最古老的照相方式与最新照相方式之间的共同点

世界上最早的照片是银板照片，这种照片于1837年问世。这一年，法国下院议员阿拉果公布了法国人达盖尔(1787～1851)的发明，这项发明是由法国政府将发明权买下来并公诸于世的。

那时候，照相时并不像现在照相时要先照出负片然后再洗印成正片，它是通过长时间曝光直接在银板表面制成图像的，所得到的图像非常美丽。由于银板不透光，是像照镜子那样从感光面直接观赏的，因而曾被称为“记忆镜”。

有一种见解认为，现在的数码照相机是经过了对银板照片进行电子化尝试之后诞生的，因而说它是最古老的银板照相法的翻新。随着摄像器件像素数目的增加和存储器件的大容量化，数码照相机的图像质量已经能够与银板照片相媲美了。

由此可见，在不经过负片加工而直接得到照片这点上，最古老的照相方式与最新的照相方式是一脉相承的。

题外话

“电池日”为什么是11月11日？

从1986年起，日本将每年的11月11日定为电池日。它是日本电池工业会为了让人们正确认识电池，掌握关于电池的知识及推广普及电池而制定的。至于为什么定在11月11日这一天，其来历有两点，一是日本销售电池最早的时间是明治25年11月；二是电池的＋极和－极连起来写就是±，因而就把电池日定在了±月±日。

题外话

让锰干电池冬眠有什么意义？

锰干电池的抗低温性能比碱性干电池差。这个说法并不意味着锰干电池在低温下就会毁坏，而是指在低温下锰干电池的电压比碱性干电池的电压低。长期放着不用的电池，其容量照样会减小，这是因为电池会产生自我放电的缘故。电池是通过化学反应来产生电的，放着不用的电池，虽然化学反应非常小，但长时间积累下来，容量也就越来越小了。

电池使用量大的公司通常都把锰干电池保存在冰箱里。这种做法也许有人会觉得过于讲究了，实际上，这样做是有道理的。锰干电池在常温下处于高电压状态，常温下长期搁置，电池的自我放电自然也就强一些。如果将其置于低温环境下，那么，电池的电压就会降低，就能有效地防止电池自我放电，从而延长电池的使用寿命。这种做法与狗熊等动物利用冬眠来防止体力消耗的道理是一样的，因而有人将其称之为“让电池冬眠”。

题外话

电池上的符号 LR6 有什么含义？

请您仔细看一下单 3 碱性干电池，是不是上面印着 LR6/1.5A 几个字？现在要问的问题是 LR6 的含义是什么？

L 是表示碱性干电池的符号，R 的意思是圆筒形，6 表示这个干电池是单 3 干电池。这些表示符号都是日本工业标准(JIS)中所规定的符号，只是里面有一些麻烦事。举例来说，JIS 中规定单 1 电池用 R20 来表示，单 2 用 R14，单 3 用 R6，单 4 用 R03 等。单 1、单 2、单 3 这样的表示方法人们已经习惯了，那么，为什么干电池是用单 1～单 5 这样的表示方法来表示的呢？

现在的单 1 干电池是按照美国早期的电池名字“Unit Manganese 1”命名的。Unit 的意思是单位，Manganese 的意思是锰，整个名字就是“单 1 号锰干电池”的意思。这个名字在日本又被进一步作了简化，于是就有了“单 1”这个名字。

现在，如果你在美国说我想买“单 1 号电池”，别人是听不懂了。超市的电池货架上所标的货签都是 AA 和 D 之类的名字。在美国，单 1 电池用 D 来表示，单 2 用 C，单 3 用 AA，单 4 用 AAA，单 5 用 N 来表示。

索 引

数字及英文字母词汇

1 的补数 …… 215
1 个计数误差 …… 278
2 的补数 …… 215
4 进计数器 …… 245
AM …… 433
AND 电路 …… 220
APOP …… 346
ARC(自动线路控制装置) …… 554
ATC(列车自动控制装置) …… 555
ATO(列车自动运行装置) …… 555
ATS(自动停车装置) …… 555
A 类放大电路 …… 136
A-D 转换 …… 247
A-D 转换电路 …… 248
BASIC 语言 …… 337
bit …… 205
BS …… 515
BSC 顺序 …… 468
B 类 PP 功率放大电路 …… 136
B 类放大电路 …… 136
CAD …… 285
CK …… 240
COBOL 语言 …… 337
CRT 显示器 …… 329
CS …… 516
CSMA/CD 方式 …… 472
CTC(列车集中控制装置) …… 554
C 语言 …… 337
DDS …… 280
DIP …… 218
DNS …… 477
DQPSK …… 512
DVDR …… 519
D 动作 …… 411
D-A 转换器 …… 249
EDTV …… 514
F/B …… 461
FFT …… 307
FFT 分析仪 …… 307
FM …… 434
FORTRAN 语言 …… 337
FTP …… 477
GPS …… 561
HDLC 顺序 …… 469
HDTV …… 514
HTML …… 343
HTTP …… 343,477
h 参数(*h* 常数) …… 125
IC …… 95
IC 存储器 …… 102
ID …… 347
IER …… 565
IMAP4 …… 346
IP …… 477
IPL …… 326
IP 地址 …… 478
IP 连接 …… 339
IP 网 …… 359
ISP …… 339
I 动作 …… 411
Java 语言 …… 337
JK-FF …… 240
LD …… 302
LED …… 302
LSB …… 208
MIME …… 343
MOS …… 218,219
MOS 型 FET …… 94
MOS 型 IC …… 97

MPEG …… 520
MSB …… 208
MUSE …… 514
NAND 电路 …… 231
NAVSTAR …… 562
NNSS …… 562
NOR 电路 …… 231
NOT 电路 …… 220
n 型 …… 76
n 型半导体 …… 76
OP 放大器 …… 101
OR 电路 …… 221
PAM …… 102,250
PCM …… 250
PGA …… 218
PID 动作 …… 411
PI 动作 …… 411
pMOS nMOS …… 95
pn 结 …… 79
POM …… 102
POP3 …… 346
POP …… 477
PPI …… 424
PS-FF …… 239
P 动作 …… 411
p 型 …… 74
p 型半导体 …… 74
SEPP 电路 …… 137,527
SMTP …… 346,477
STP 电缆 …… 445
Suica …… 558
SYN 同步方式 …… 469
TCP/IP …… 477
TCP …… 477
telnet …… 477
TTL …… 100,218
TTL-IC …… 254
UDP/IP …… 477
URL …… 343
UTP 电缆 …… 445
VTR …… 519
Web 网页 …… 344
Wel 浏览器 …… 344
XNOR 电路 …… 234
XOR 电路 …… 233
X-Y 绘图仪 …… 330
YAG 激光 …… 549
λ/4 接地天线 …… 458

汉字词汇

A

安培环路定律 …… 9
安培右螺旋定律 …… 8

B

八木-宇田天线 …… 458
半波长天线 …… 458
半波整流电路 …… 172
半导体激光器 …… 104
半功率角 …… 460
半加器 …… 235
半双工通信 …… 431
包络线检波 …… 170
饱和型脉冲放大电路 …… 202
保持 …… 239
倍频器 …… 454
被覆层 …… 449
本征半导体 …… 71
比较器 …… 247
比相器 …… 255
笔式绘图机 …… 285
毕奥-萨伐尔定律 …… 8

闭塞 …… 554
边缘触发 …… 240
编码器 …… 237
变址寄存器 …… 321
标志寄存器 …… 321
并行连接 …… 421
并行数据 …… 242
拨号机构 …… 436
拨号连接 …… 339
拨号信号(PB信号) …… 437
玻尔半径 …… 63
玻尔量子条件 …… 63
补码器 …… 321
补数 …… 215
布尔代数 …… 225
步进电动机 …… 285

C

采样 …… 250
操作量 …… 394
测量 …… 260
插值法 …… 287
查询/选择方式 …… 469
查询 …… 469
差动变压器 …… 376
差动连接 …… 21
长波(LF) …… 451
长度系数 …… 19
长冈-卢瑟福原子模型 …… 62
超导 …… 107
超短波(VHF) …… 451
超外差式 …… 455
超外差型 …… 304
充电 …… 31
触发电路 …… 188
触发功能 …… 279
触摸屏 …… 328
传播速度 …… 484
传导噪声 …… 296
传递函数 …… 255
传感器 …… 299
传输线 …… 443
串联式稳压电路 …… 175
串行打印机 …… 329
串行连接 …… 421
串行输入数据 …… 243
垂直偏转板 …… 281
垂直偏转电流 …… 505
垂直扫描 …… 503
垂直同步 …… 506
纯滞后环节 …… 399
磁场强度 …… 13
磁化曲线(*B-H* 曲线) …… 22
磁偏转 …… 493
磁铁型 …… 376
磁性体 …… 23
磁滞回线 …… 23
存储部分 …… 378
存取 …… 102
存取时间 …… 102

D

带隙 …… 68
戴维南定理 …… 52
单工通信 …… 431
单模 …… 449
单声道广播 …… 500
导带 …… 69
德布罗意波 …… 63
德·摩根定理 …… 226
等感曲线 …… 485
等离子体 …… 544
等离子体喷射 …… 546
等离子体显示器 …… 329

等效电路 …… 55
低通滤波器 …… 255
电场 …… 3,27
电场强度 …… 292,460
电场强度测量仪 …… 292
电磁波 …… 4
电磁感应 …… 16
电磁继电器 …… 366
电磁力 …… 12
电导率 …… 4
电荷 …… 2
电介质 …… 32
电介质极化 …… 31
电缆电视 …… 517
电离气体 …… 544
电流传输特性 …… 88
电流反馈偏压电路 …… 123
电桥平衡 …… 287
电容 …… 29
电容型 …… 376
电视天线 …… 292
电位差 …… 27
电压 …… 3,27
电压反馈偏压电路 …… 122
电压反馈特性 …… 88
电压反馈系数 …… 126
电源 …… 33
电源电路 …… 172
电子 …… 2
电子波 …… 63
电子电压表 …… 274
电子枪 …… 281,493
电子扫描方式 …… 524
电子束 …… 281
电子血压计 …… 566
电阻率 …… 4
调幅 …… 167
调谐电路的品质 …… 139
调谐式高频放大电路 …… 139
调制 …… 250
调制度 …… 168
调制器 …… 454
调制系数 …… 168
定标 …… 249
定常偏差 …… 396
定常状态 …… 396
动圈式仪表 …… 265
动态特性 …… 87
短波(HF) …… 451
对称电缆 …… 444
对等系统 …… 472
对流层散射通信 …… 463
多模 …… 449
多普勒效应 …… 573
多输入门电路 …… 233
多数载流子 …… 75

E

二极管 …… 79,81
二进制数 …… 205

F

发射极电阻 …… 123
发射极接地 …… 88
发射极接地直流电流放大系数 …… 112
发射结 …… 85
法拉第定律 …… 16
翻转 …… 241
反馈 …… 239
反馈式稳压电路 …… 175
反馈系数 …… 132
反相器 …… 231
反向恢复特性 …… 184
反向偏压 …… 81

反转层 …… 94
范式 …… 229
方波 …… 182
方框图 …… 393
防火墙 …… 352,473
放电 …… 31
非饱和型脉冲放大电路 …… 202
非加载 …… 379
非接触 IC 卡 …… 557
非扫描式 …… 303
非正弦交流电 …… 37
费米-狄拉克的分布函数 …… 70
费米能级 …… 70,71
费米能量 …… 70
分贝(dB) …… 297
分辨力 …… 551
分布参数电路 …… 54,443
分频电路 …… 254
分压电阻 …… 123
峰值(P 型)电子电压表 …… 275
峰值 …… 275
弗莱明右手定则 …… 17
弗莱明左手定则 …… 12
辐射测热 …… 289
辐射噪声 …… 296
负荷 …… 379
负钳位电路 …… 198
负载 …… 33
负载电阻 …… 115
负载线 …… 118
复数 …… 41
复位 …… 366
复位状态 …… 239
副扫描 …… 524
傅里叶变换 …… 306

G

感抗 …… 43
感应电动势 …… 16
感应电桥型 …… 376
高阶惯性环节 …… 399
高密度等离子体 …… 545
高频 …… 271
高频跨变 …… 303
高频振荡型 …… 376
隔行扫描 …… 504
各种寄存器 …… 321
工业所有权 …… 357
工作点 …… 118
工作速度 …… 99
功率传感器 …… 290
功率放大器 …… 454
共用电视系统 …… 292
沟道 …… 94
固定电荷 …… 79
固体激光 …… 549
关闭时间 …… 186
管制空域 …… 563
管制区 …… 563
管制圈 …… 563
光 …… 301
光电导型摄像管 …… 492
光功率表 …… 302
光缆 …… 301
光学式标志读取装置 …… 328
光学式文字读取装置 …… 328
硅 …… 64
过调制 …… 433
过渡现象 …… 56
过渡响应 …… 396
过滤 …… 473

H

海上管制区 …… 563
骇客 …… 352

航空交通管制业务 …… 563
航空枢纽管制 …… 564
航线管制 …… 564
航线管制负责的准降管制 …… 564
耗尽层 …… 79
和动连接 …… 21
黑客 …… 352
互感 …… 20
互感系数 …… 20
互联网业务提供商 …… 339
环路增益 …… 132
环形计数器 …… 245
环形连接方式 …… 471
辉光放电 …… 544
回扫时间 …… 505
汇编语言 …… 337
惠斯通电桥 …… 286

J

击穿电压 …… 81
机场管制 …… 564
机器语言 …… 337
积分电路 …… 58,195
畸变波交流电 …… 37
激光 …… 548
激光打印机 …… 330
激活区域 …… 104
集成度 …… 98,99
集电极的断路电流 …… 89
集电极功率损耗 …… 91
集电结 …… 85
集线器 …… 473
加载 …… 379
夹断电压 …… 92
价电子 …… 64
价电子带 …… 69
检波(再生)中继方式 …… 462
键盘 …… 328
交流电 …… 37
焦耳定律 …… 5
焦耳热 …… 5
阶跃输入 …… 396
阶跃响应 …… 396
截底 …… 197
截顶 …… 197
解调 …… 250,433
介电常数 …… 24
金刚石结构 …… 66
禁带 …… 68
晶格 …… 65
晶格缺陷 …… 65,107
晶格振动 …… 72
晶体 …… 65
晶体振荡器 …… 253
静电 …… 24
静电力 …… 24
静电能 …… 31
静电偏转 …… 493
静电式绘图机 …… 285
静态特性 …… 87
锯齿波 …… 199

K

卡诺图 …… 227
开启时间 …… 186
客户机/服务器系统 …… 472
空穴 …… 69
控制量 …… 393
控制偏差 …… 393
控制系统 …… 393
控制装置 …… 318,393
库仑定律 …… 24
快速傅里叶变换 …… 307
快速性 …… 411

宽带网 …… 339
扩散电流 …… 73

L

累加器 …… 321
楞次定律 …… 17
离子 …… 2
立体声广播 …… 500
链接 …… 343
量化 …… 250
临界温度 …… 107
令牌方式 …… 472
路径选择 …… 473
路由器 …… 473
逻辑变量 …… 225
逻辑电路 …… 220
逻辑非 …… 226
逻辑函数 …… 225
逻辑和 …… 226
逻辑积 …… 225
逻辑值 …… 225
洛伦兹力 …… 12

M

脉冲编码调制 …… 250
脉冲振幅调制 …… 250
门控功能 …… 279
门限电平 …… 191
米勒积分电路 …… 200
米勒效应 …… 201
面心立方晶格 …… 65
模拟量 …… 260
模拟式、锁相式、数字式 …… 279

N

奈奎斯特稳定性判别法 …… 414
内部接口 …… 423
内联网 …… 352
能带 …… 67
能带结构 …… 68
能级 …… 64

O

欧姆定律 …… 5,34
偶数场 …… 504
耦合电容 …… 120
耦合电容器 …… 130
耦合系数 …… 21

P

拍频现象 …… 165
旁路电容器 …… 130
抛物面天线 …… 459,515
泡利不相容原理 …… 67
喷墨式打印机 …… 330
喷墨式绘图机 …… 285
批处理 …… 336
偏压 …… 79
偏转 …… 493
漂移电流 …… 72
频分多路复用 …… 446
频率 …… 38,277
频率调制 …… 434
频率合成器 …… 256
频率计 …… 277
频率鉴别器 …… 456
频谱分析 …… 303
平方律检波 …… 170,455
平衡法(零位法) …… 287
平均值 …… 38
平均值检波 …… 170
平面天线 …… 515

Q

奇数场 …… 504
气体激光 …… 549
启动 …… 366
迁移率 …… 3
前置放大器 …… 526
钳位电路 …… 198
强磁性体 …… 23
权重 …… 205
全波整流电路 …… 172
全加器 …… 236
全双工通信 …… 431

R

扰动 …… 395
热电偶 …… 271
热电式电流表 …… 271
热敏打印机 …… 329
热敏记录 …… 524
容抗 …… 43
入口地点 …… 343
软盘 …… 331
弱电离等离子体 …… 544

S

扫描 …… 503
扫描电子显微镜 …… 552
扫描式 …… 303
扫描线 …… 503
扫描信号 …… 281
上边带 …… 434
上行链接 …… 465
少数载流子 …… 75
少数载流子存储效应 …… 185
舌簧管 …… 376
甚短波(UHF) …… 451
声波 …… 484
声压 …… 485
声压级 …… 485
施密特触发电路 …… 189,191,277
施主 …… 76
施主能级 …… 76
时分多路复用 …… 447
时分话路交换 …… 438
时间常数 …… 56,194,399
时序图 …… 243
时钟输入端 …… 240
实部 …… 41
实时处理 …… 336
势垒 …… 79
势垒电压 …… 79
手动控制 …… 394
受激发射 …… 105
受主 …… 74
受主能级 …… 74
输出部分 …… 378
输出导纳 …… 126
输出特性 …… 88
输出装置 …… 318
输入/输出接口 …… 378
输入部分 …… 378
输入特性 …… 88
输入装置 …… 318
输入阻抗 …… 126
鼠标 …… 328
数字 IC …… 218
数字量 …… 260
数字脉冲 …… 254
数字示波器 …… 282
数字移动无线发射机测试仪 …… 309
刷新 …… 103
双极晶体管 …… 84

双极型 IC …… 97
双稳态多谐振荡器 …… 188
双异质结 …… 104
水平偏转板 …… 281
水平偏转电流 …… 504
水平扫描 …… 503
水平同步 …… 506
顺序控制计数器 …… 321
瞬时值 …… 38
伺服电机 …… 284
算法 …… 307
算术逻辑运算装置 …… 318
损耗特性 …… 301
锁定时间 …… 255

T

特征频率 …… 140
特征阻抗 …… 54
梯形图 …… 379
条件方式 …… 469
条形码 …… 328
通用宽带放大电路 …… 139
同步 …… 506
同步信号 …… 503
同或电路 …… 234
透射电子显微镜 …… 551
图像扫描器 …… 328
图像信号 …… 506
图像信号电流 …… 524
图形输入板 …… 329

W

外部接口 …… 423
外差中继方式 …… 462
网关 …… 473
网络分析仪 …… 310
网桥 …… 473
网上交易 …… 349
微波 …… 451
微分电路 …… 58,194
位移电流 …… 4
文氏图 …… 227
纹波系数 …… 174
稳定化光源 …… 302
稳态 …… 56,187
无电源中继方式 …… 463
无稳态多谐振荡器 …… 187
无源电路 …… 51
无源器件 …… 51
物质波 …… 63
误差 …… 260

X

下边带 …… 434
下行链接 …… 465
线性检波 …… 455
相对误差 …… 261
相干 …… 548
相位 …… 39
相位差 …… 39
相位裕度 …… 415
像素 …… 503
削波电路 …… 197
消耗功率 …… 99
小信号电流放大系数 …… 112,126
校正法 …… 139
校正率 …… 261
协议 …… 339
谐振频率 …… 47
心电图 …… 567
芯线 …… 449
信号电平表 …… 292
信号电压S …… 297

信号发生器 …… 279
信噪(S/N)比 …… 297
星形连接方式 …… 472
行式打印机 …… 329
虚部 …… 41
选择 …… 469
寻址 …… 102

Y

压电效应 …… 162
压控振荡器 …… 255
延时功能 …… 242
阳极 …… 81
液晶显示器 …… 329
移位功能 …… 243
移位寄存器 …… 243,321
移像型摄像管 …… 492
异或 …… 233
异质结 …… 104
译码器 …… 102,237
阴极 …… 81
阴极射线管示波器 …… 281
音频 …… 271
硬盘 …… 331
邮件服务器 …… 346
有效扫描线长度 …… 505
有效扫描线数 …… 505
有效值 …… 38
有源器件 …… 51
语音输入装置 …… 329
域名 …… 347
阈值 …… 184
阈值电压 …… 94
源极接地 …… 141
约瑟夫森效应 …… 107
约瑟夫森元件 …… 108
允带 …… 67
运算放大器 …… 101,143
运算控制部分 …… 378

Z

杂散电容 …… 289
杂质半导体 …… 74
载波 …… 250
载波通信 …… 446
载流子 …… 71
暂稳态 …… 187
噪声 …… 296
噪声电压N …… 297
噪声指数NF …… 297
增益 …… 461
增益常数 …… 399
增益特性 …… 406
增益裕度 …… 415
账户 …… 347
真值表 …… 220
振荡 …… 152
振荡器 …… 454
振幅调制 …… 433
振幅限制电路 …… 197
振铃机构 …… 436
整流 …… 81
正反馈 …… 152
正钳位电路 …… 198
正弦交流电 …… 37
正向恢复特性 …… 184
正向偏压 …… 81
知识产权 …… 356
直接高频放大式 …… 455
直接中继方式 …… 463
直流电 …… 33
直线电机 …… 15
直线检波 …… 170
指令地址寄存器 …… 320

指令寄存器 …… 320
指令译码器 …… 321
置位状态 …… 239
中波(MF) …… 451
中继器 …… 473
中介公司 …… 349
中央处理装置 …… 318
周期 …… 38
周期脉冲 …… 182
周期性振荡 …… 413
逐次比较 …… 248
主存储装置 …… 318
主反馈 …… 393
主放大器 …… 526
主控室 …… 499
主扫描 …… 524
主页 …… 343
注入载流子 …… 79
著作财产权 …… 356
著作邻接权 …… 356
著作权 …… 356
转折点角频率 …… 407
准降管制 …… 564
子网掩膜 …… 479
自动反馈控制 …… 394
自动计费卡 …… 557
自动平衡电位差计 …… 284
自感 …… 18
自感系数 …… 18
自举电路 …… 201
自偏压电路 …… 122
自旋 …… 23
自由电子 …… 69
自由振荡频率 …… 147
字节 …… 205
总线形连接方式 …… 471
阻抗 …… 44
阻抗匹配 …… 55
阻塞状态 …… 240
最大额定值 …… 82
最大可听值 …… 485
最大频偏 …… 434
最密堆积六方晶格 …… 65
最外层轨道 …… 64
最小可听值 …… 485
作者的名誉权 …… 356